



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

**Veränderung der Eigenkorrosion von Stahl in chloridhaltigem Beton
in Abhängigkeit des Feuchtegehalts**

Andreas Manfred Fraundorfer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Alisa Machner

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
2. Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt

Die Dissertation wurde am 19.04.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 29.09.2022 angenommen.

VORWORT

Diese Arbeit ist im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt „Korrosionsmonitoring bei der Instandsetzung von chloridbelasteten Stahlbetonbauwerken“, kurz: „KoMICS“, im Rahmen der WIPANO-Richtlinie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) entstanden. Das Projekt lief in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), der Technischen Universität München (TUM) und der Hochschule für angewandte Wissenschaften München (HM) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) und vier Industriepartnern. Der TUM als kooperativen Promotionseinrichtung und der HM, bei der ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter das zugehörige Teilprojekt bearbeiten konnte, möchte ich ebenso danken, wie dem BayWISS-Verbundkolleg „Infrastruktur, Bauen und Urbanisierung“, über das diese Promotion zustande kam. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TUM) danke ich für die Möglichkeit zur Dissertation sowie seine Unterstützung und die Zeit, die er sich immer gerne für mich genommen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt (HM) möchte ich dafür Danke sagen, dass er mich auf meinem ganzen Weg, seit ich ihn kenne, immer motiviert und in jederlei Hinsicht unterstützt hat.

Meinen Kollegen, allen voran Herrn Patrick „Patricio“ Breugl, Herrn Peter Failer, Herrn Frederik Ripa, Frau Nives von Branka und Herrn Dr. Felix „Lixl“ Becker gilt besonderer Dank. Immer eine super Stimmung und eine stets gern helfende Hand sind bei mir unvergessen. Des Weiteren möchte ich mich bei unserer Schlosserei sowie Herrn Thomas Heilmayer, Herrn Martin Lutz, Herrn Benjamin Wolf, Frau Katrin Traube, Herrn Abdulmuti Alshehabi, Frau Haya Olaby, Frau Katja Müller, Herrn Cornelius Puth und Herrn Markus Bertsch bedanken, die mich bei Bedarf immer unterstützt haben. Herrn Gino Ebell (BAM) danke ich für die Hilfestellungen zu Beginn des Forschungsprojekts. Der Firma LMI Technologies GmbH möchte ich für die Unterstützung mit Messequipment zur Topometrie danken.

Meiner Familie gebührt meine größte Anerkennung. Meinen Eltern dafür, dass sie immer für mich da sind. Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Lisa und unseren Kindern Paulina und Sophia: Ihr seid die größte Motivation für mich und zugleich auch mein Ruhepol. Letztendlich konnte diese Arbeit auch nur durch Dich entstehen, Lieschen. Du bist immer verständnisvoll und hältst mir den Rücken frei, wenn es notwendig ist. Durch Dich hatte ich das nötige Potential, diese Arbeit möglichst widerstandsfrei zu vollenden, auch wenn ich dabei manchmal unter Strom stand...

KURZFASSUNG

Diese Arbeit befasst sich mit der Veränderung der Eigenkorrosion an der Bewehrung von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen, in Abhängigkeit des Feuchtegehalts durch Trocknungsprozesse. Die Ergebnisse der Untersuchungen besitzen insbesondere Relevanz für die Anwendung von Korrosionsmonitoring zur Überwachung von Korrosionsprozessen an der Bewehrung. Zunehmende Trockenheit kann sich dabei unter verschiedensten Randbedingungen ergeben. Als wohl gängigster Fall ist exemplarisch die Applikation von Beschichtungen auf chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen bei Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 nach *TR Instandhaltung* [1] genannt. Das Korrosionsmonitoring dient dabei an neuralgischen Punkten zum Nachweis des Instandsetzungserfolgs. Zunehmende Eigenkorrosion bei höherer Trockenheit birgt die Gefahr, dass durch die errechneten elektrochemischen (coulometrischen) Masseverluste aus den Monitoringdaten die tatsächlichen Schädigungen zunehmend unterschätzt werden. Dies würde zu einer Fehlinterpretation des Instandsetzungserfolgs auf der unsicheren Seite führen.

Das Untersuchungskonzept basiert auf eingangs ermittelten Sorptionseigenschaften und Feuchtegehalts-Widerstandsbeziehungen der Betone. Anhand der ermittelten Sorptionsisothermen konnten die Stahlbetonprobekörper der Korrosionsversuche durch eine beschleunigte Trocknung zügig auf deren Ausgleichsfeuchtegehalte gebracht werden. Dort war eine zielgerichtete Untersuchung der Proben über die Zeit möglich. Die Eigenkorrosionsanteile konnten dadurch in Abhängigkeit der Lagerungs- und Probenfeuchte differenziert betrachtet werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass abnehmende Bauteilfeuchten in steigenden Eigenkorrosionsanteilen resultieren. Die tatsächlich stattfindende Korrosion an der Bewehrung wird mit geringeren Feuchtegehalten im Beton ohne Berücksichtigung der Eigenkorrosion somit zunehmend unterschätzt. Die festgestellten Masseverluste der untersuchten Stähle wurden dabei allerdings auch immer geringer. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass der Eigenkorrosionsanteil aus dem Makroelementstrom unter Berücksichtigung der Streuungen abgeschätzt werden kann. Der festgestellte Zusammenhang deckt sich mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Randbedingungen, wie durch Einbeziehung von Literaturergebnissen in die Auswertung bestätigt werden konnte. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern damit einen Beitrag zur einfacheren und genaueren Interpretation der Messdaten beim Korrosionsmonitoring im Stahlbetonbau.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort.....	III
Kurzfassung.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
1 Einführung und Zielsetzung.....	1
2 Bewehrungskorrosion in Stahlbeton.....	3
2.1 Grundlagen der Korrosion von Stahl in Beton.....	3
2.1.1 Allgemeines.....	3
2.1.2 Carbonatisierungsinduzierte Korrosion.....	4
2.1.3 Chloridinduzierte Korrosion.....	6
2.1.4 Feuchtesorption von Beton.....	10
2.1.5 Korrosionssystem.....	12
2.1.6 Eigenkorrosion.....	15
2.1.7 Schädigungstiefen und Querschnittsverluste.....	17
2.2 Korrosionsmonitoring.....	20
3 Untersuchungsmethodik und Versuchsreihen.....	23
3.1 Untersuchungsmethodik.....	23
3.2 Betonrezepturen.....	24
3.3 Versuchsreihen und Probekörper.....	26
3.4 Messanoden.....	28
4 Versuchsdurchführung.....	31
4.1 Vorbemerkungen.....	31
4.2 Sorption.....	32
4.3 Wärmebehandlung und Vorschädigung.....	33
4.4 Elektrochemische Untersuchungen.....	34
4.4.1 Potentiale.....	34
4.4.2 Makroelementströme.....	34
4.4.3 IR-Korrektur, Impedanz und Phasenwinkel.....	37

4.4.4	Elektrolytwiderstände	39
4.4.5	Polarisationswiderstände	41
4.4.6	Strom-Potentialkurven	42
4.5	Gravimetrie und Beizen.....	43
4.6	Mikroskopie und Topometrie	45
5	Untersuchungsergebnisse und Diskussion	50
5.1	Allgemeines.....	50
5.2	Einfluss der Trocknung auf korrosionsrelevante Betonparameter	50
5.2.1	Allgemeines	50
5.2.2	Sorptionsisothermen und Porenverteilung.....	50
5.2.3	Elektrolytwiderstände und Phasenwinkel.....	53
5.2.4	Erkenntnisse.....	59
5.3	Einfluss der Trocknung auf korrosionsrelevante Parameter der Messelektroden.....	60
5.3.1	Allgemeines	60
5.3.2	Einfluss der Vorschädigung.....	60
5.3.3	Freie Korrosionspotentiale und Polarisationswiderstände	62
5.3.4	Makroelementströme und elektrochemisch ermittelte Masseverluste.....	66
5.3.5	Erkenntnisse.....	69
5.4	Maßgebende Steuerungsparameter der Korrosion bei Trocknung.....	70
5.4.1	Allgemeines	70
5.4.2	Versuchsordnung zur Ermittlung der Steuerungsparameter	70
5.4.3	Steuerungsparameter des Makroelementstroms	71
5.4.4	Strom-Potentialkurven.....	75
5.4.5	Erkenntnisse.....	76
5.5	Gravimetrische Masseverluste und Eigenkorrosion.....	77
5.6	Topometrie und Querschnittsverluste	81
5.7	Zusammenhang erfasster Einflussgrößen auf die Eigenkorrosion bei Trocknung....	84
6	Auswirkungen falsch berücksichtigter Eigenkorrosionsanteile.....	88
6.1	Allgemeines.....	88

6.2	Beispielrechnung 1	91
6.3	Beispielrechnung 2	92
6.4	Diskussion der Beispielrechnungen.....	93
7	Übertragung der Ergebnisse auf Monitoring am Bauwerk.....	95
7.1	Allgemeines	95
7.2	Abhängigkeit des Eigenkorrosionsanteils von der Makroelementstromdichte	96
7.3	Empfehlung für das Vorgehen in der Praxis.....	100
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
9	Verzeichnisse.....	107
9.1	Literatur	107
9.2	Abkürzungen.....	122
9.3	Symbole	122
9.4	Indizes.....	123
Anhang A:	Diagramme.....	125
A.1	Wärmebehandlung und Vorschädigung	125
A.2	Feuchtegehalte und Elektrolytwiderstände.....	127
A.3	Eoc und Polarisationswiderstände	133
A.4	Elementströme und Masseverluste	140
A.5	Strom-Potentialkurven.....	150
A.6	Topometrie und Querschnittsverluste.....	151
A.7	Klimadaten.....	152
Anhang B:	Tabellen.....	153
B.1	Materialien	153
B.2	Messgeräte	156
Anhang C:	Probekörperaufbauten	157
C.1	Versuchsreihe A.....	157
C.2	Versuchsreihe B.....	158

1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG

Stahlbeton ist in der heutigen Zeit ein nicht wegzudenkender Baustoff. Die relativ kostengünstige Herstellung und das breite Aufgabenspektrum, mit immer neu erschlossenen Anwendungsmöglichkeiten durch Sonderbetone, unterstützen die beliebte und häufige Verwendung. Die in der Regel gute Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen kann jedoch insbesondere durch Chlorideinwirkung, beispielsweise aus Tausalz und Meerwasser, bei damit einhergehender Bewehrungskorrosion gefährdet sein. Nach *Schießl und Mayer* [2] betragen die Schäden an Brückenbauwerken infolge chloridinduzierter Bewehrungskorrosion im deutschen Autobahnnetz anteilig rd. 2/3 in Bezug zum gesamten Schadensvolumen. *Yilmaz und Angst* [3] beziffern allein die direkten korrosionsbedingten Instandsetzungskosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz auf rd. 0,08 % des Bruttoinlandsprodukts (BIP). Überträgt man diese Kosten, die in der Größenordnung laut den Autoren mit Daten aus den USA übereinstimmen, näherungsweise auf das deutsche BIP, ergeben sich für das Jahr 2021 Kosten für die Instandsetzung von Ingenieurbauwerken allein im Straßennetz von rd. 2,9 Mrd. € (BIP = 3.570,6 Mrd. € [4]).

Für die Instandsetzung chloridbelasteter Stahlbetonbauteile existieren mehrere Verfahren, die in der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (*RL-SIB*) [5] sowie der Technischen Regel Instandhaltung (*TR Instandhaltung*) [1] aufgeführt sind. Eine Alternative zu einer konventionellen Instandsetzung, in deren Zuge der chloridbelastete Beton invasiv abgetragen und durch neuen Beton ersetzt wird, stellt das Instandsetzungsprinzip W-Cl nach *RL-SIB* [5] beziehungsweise Verfahren 8.3 nach *TR Instandhaltung* [1] dar. Ziel dieses Verfahrens ist, die Feuchte im chloridbelasteten Beton über eine Beschichtung zu regulieren. Durch eine Austrocknung soll der elektrolytische Widerstand des Betons so weit erhöht werden, dass vorhandene Korrosionsprozesse zum Erliegen kommen. Diese Instandsetzungsvariante wird in Fachkreisen seit Jahren kontrovers diskutiert und gab Anlass für zahlreiche Forschungsarbeiten und Untersuchungen auf dem Gebiet, siehe beispielsweise [6–10]. In den oben genannten Regelwerken existieren auch Hinweise, dass bei chloridbelasteten Betonen ein Austrocknungseffekt unter Umständen nicht mehr zu erwarten ist. Sofern der chloridbelastete Beton im Bauwerk verbleibt, ist der weitere Korrosionsfortschritt mit geeigneten Sensoren durch den sachkundigen Planer zu überwachen. Die Installation solcher Sensoren, insbesondere eines Korrosionsmonitorings an Stahlbetonbauwerken, kann jedoch nicht ausschließlich beim Anwendungsfall W-Cl bzw. Verfahren 8.3 zum Nachweis eines Instandsetzungserfolgs sinnvoll sein. Bei Installation in einem Neubau können dadurch Depassivierungszeitpunkte der Bewehrung erkannt werden

und beispielsweise tiefengestaffelte Korrosionswahrscheinlichkeiten zerstörungsfrei abgeleitet werden. Ebenso eröffnen sich Wege, ein Bauwerk über eine geplante Restnutzungsdauer zu überwachen, indem stattfindende Korrosionsereignisse über die Zeit erfasst werden. Hinweise und Informationen hierzu sind unter anderem im Merkblatt B 12 der DGZfP [11] zu finden.

Bei der Erfassung elektrochemischer Kenngrößen ist die Eigenkorrosion eine Systemeigenschaft, die bei der Interpretation und Bewertung der Daten berücksichtigt werden muss. Diese beschreibt den Korrosionsprozess, der auf der für die Messung als Anode betrachteten Messelektrode selbst abläuft und sich dabei einer Erfassung durch das Monitoring entzieht. Hierzu existieren ebenfalls einige Untersuchungen, die sich jedoch überwiegend auf relativ feuchte Umgebungsbedingungen beziehen [12–14]. Dabei wird von *Schiegg* [14] bereits darauf hingewiesen, dass der Eigenkorrosionsanteil durch Austrocknung des Bauteils stärker wird und zu einer größeren Fehlinterpretation der Messdaten des Monitorings führen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Eigenkorrosion von Bewehrungsstahl bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und den zugehörigen Betonfeuchten von chloridbelasteten Betonen bei Desorption untersucht und interpretiert. Die Untersuchungen beziehen sich auf das Korrosionsmonitoring an Bestandsbauwerken, die sich bereits in der Schädigungsphase nach *Tuutti* [15] befinden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei insbesondere auf trockenen Umgebungsbedingungen, bei denen aktive Korrosionsprozesse aus der Interpretation der elektrochemischen Messdaten heraus vermeintlich zum Erliegen kommen. Die Ergebnisse liefern einen Rückschluss, ob durch die Trocknung nennenswerte Korrosionsereignisse auf der Messanode stattfinden, die sich der Messung entziehen. Dadurch würde eine Schädigung und damit ein weiterer Querschnittsverlust an der Bewehrung unentdeckt im Bauteil ablaufen können.

Ziel dieser Arbeit ist die Aussagegenauigkeit von elektrochemischen Messungen an Stahl in Beton feuchteabhängig zu validieren und somit einen Beitrag zur besseren Aussagekraft der Messergebnisse bei Anwendung eines Korrosionsmonitorings an Stahlbetonbauwerken zu schaffen.

2 BEWEHRUNGSKORROSION IN STAHLBETON

2.1 GRUNDLAGEN DER KORROSION VON STAHL IN BETON

2.1.1 ALLGEMEINES

Korrosion wird in DIN EN ISO 8044 definiert als: *„physikochemische Wechselwirkung zwischen einem metallenen Werkstoff und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann“* [16]. Grundlage der Korrosion ist dabei immer das Bestreben eines Metalls, in einen thermodynamisch energieärmeren Zustand überzugehen. Im Fall von Stahl ist das exemplarisch der Zustand eines Erzminerals, meist auf Eisenoxidbasis, vor dessen Verhüttung. Der Begriff Korrosion ist dabei im Sprachgebrauch in der Regel mit einer negativen Veränderung der Materialeigenschaften verbunden. Allerdings zählt auch eine gewünschte Bildung schützender Oxidschichten zur Korrosion.

Unterscheiden lassen sich bei Metallen die „chemische Korrosion“ und die „elektrochemische Korrosion“. Chemische Korrosion findet ohne Elektrolyteinfluss statt. Exemplarisch ist dies die Oxidation von Stahl bei hohen Temperaturen unter Bildung einer Zunderschicht auf dessen Oberfläche. Dort findet der Ladungsübergang der Reaktionspartner direkt, ohne Elektronenfluss, statt. Bei der elektrochemischen Korrosion hingegen ist das Vorhandensein eines Elektrolyten Voraussetzung, durch den ein Ladungsaustausch stattfinden kann. Diese Art der Korrosion ist der deutlich häufiger anzutreffende Mechanismus und bei Stahl in Beton maßgeblich.

Die hohe Alkalität des Betons im Bereich von pH-Werten $> 12,5$ führt zu einer Deckschichtbildung aus Fe_3O_4 an der Stahlseite und einer nach [17] poröser werdenden $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Schicht in Richtung Elektrolytseite [18]. Diese unlöslichen Oxide stellen eine Passivschicht dar, die einen weiteren Korrosionsangriff auf den Bewehrungsstahl hemmt. Die wenige Nanometer dicke Passivschicht [19] unterliegt dabei einem stetigen Wandel [20], daraus bedingte Materialverluste können technisch als vernachlässigbar klein betrachtet werden.

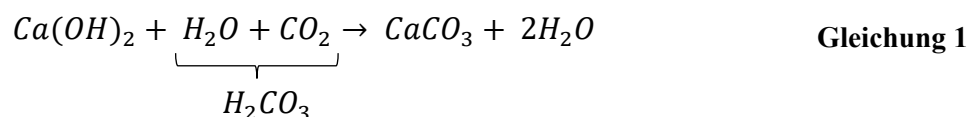
Die Dauerhaftigkeit des Bewehrungsstahls in Beton kann unter gewissen Randbedingungen aber gefährdet sein, insbesondere wenn mindestens eine der nachfolgenden Voraussetzungen auftritt:

1. Abnahme der Alkalität des Betons (pH-Wert-Verringerung).
2. Anwesenheit von Schadstoffen im Beton.

Für beide Fälle existieren verschiedene Mechanismen, die zu einer Bewehrungskorrosion führen können. Eine Verringerung des pH-Werts im Beton entsteht dabei in der Praxis jedoch überwiegend durch Carbonatisierung des Betons. Wenngleich auch verschiedene Schadstoffe zu einem Angriff des Stahls führen können, so stellt die Einwirkung von Chloridionen (Cl^-) aus Taumitteln oder Meerwasser die häufigste Schadensursache bei Stahlbetonbauwerken in Deutschland dar [21]. Beide Mechanismen haben gemein, dass sie primär die Bewehrung schädigen. Nachfolgend wird daher näher auf die carbonatisierungsinduzierte und chloridinduzierte Korrosion eingegangen. Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Lokal- und Makroelemente sind idealisiert dargestellt. Tatsächlich ist das Auftreten von Mischformen wahrscheinlich [22]. In der Praxis findet zudem oft bei Bestandsbauwerken eine Kombination aus carbonatisierungs- und chloridinduzierter Korrosion statt.

2.1.2 CARBONATISIERUNGSINDUZIERTE KORROSION

Die carbonatisierungsinduzierte Korrosion kann auftreten, wenn Beton bis auf Höhe der Bewehrung carbonatisiert ist. Die Carbonatisierungsreaktion kann je nach Randbedingung einen Abfall des pH-Werts bis auf Werte < 9 bewirken [23]. Vereinfacht kann sie nach folgender Reaktionsgleichung beschrieben werden:



Der Carbonatisierungsfortschritt ist eine Neutralisation des alkalisch wirkenden Calciumhydroxids mit Kohlensäure, die sich aus Wasser mit Kohlendioxid aus der Luft bildet. Die Einzelreaktionen sind dabei deutlich komplexer [24]. Die Geschwindigkeit des Fortschritts über

die Bauteiltiefe ist dabei von vielen Randbedingungen wie Zementgehalt, Exposition, Temperatur etc. abhängig und wird mit der Zeit geringer. Modelle zur Beschreibung der Carbonatisierung beruhen meist auf dem 1. Fick'schen Diffusionsgesetz [25–27]. Zu einer Schädigung der Bewehrung führt die Carbonatisierung selbst vorerst nicht. Die Passivschicht der Bewehrung ist durch das Absinken des pH-Werts < 11 allerdings nicht mehr ausreichend stabil [23]. Damit schädigende Korrosion an der Bewehrung stattfinden kann, ist zusätzlich noch das Vorhandensein von ausreichend Wasser und Sauerstoff nötig.

Der Korrosionsmechanismus, der bei großflächiger Carbonatisierung meist stattfindet, wird in der Literatur als Mikrozellkorrosion [28, 29] beziehungsweise Lokalelement [22] beschrieben. Der Korrosionsvorgang entspricht einer homogenen Mischelektrode [12]. Das Anoden-/Kathodenverhältnis ist hier ähnlich groß und über die Stahloberfläche wechselnd verteilt. Das führt makroskopisch betrachtet zu einem relativ gleichmäßigen, flächigen Korrosionsfortschritt, der oft mit deutlich sichtbaren Abplatzungen und Rissbildungen am Beton aufgrund des flächigen Volumenzuwachses der Korrosionsprodukte einhergeht. Eine Querschnittsverringerung an der Bewehrung findet dabei meist nur langsam statt. Abweichend zur homogenen Mischelektrode sind bei der heterogenen Mischelektrode (wie der Lochkorrosion) die benachbarten Teilstromdichten unterschiedlich groß [30]. Die Summenströme müssen aus Elektroneutralitätsgründen makroskopisch betrachtet gleich sein. Die verschiedenen Korrosionsarten sind in **Abb. 1** schematisch verdeutlicht.

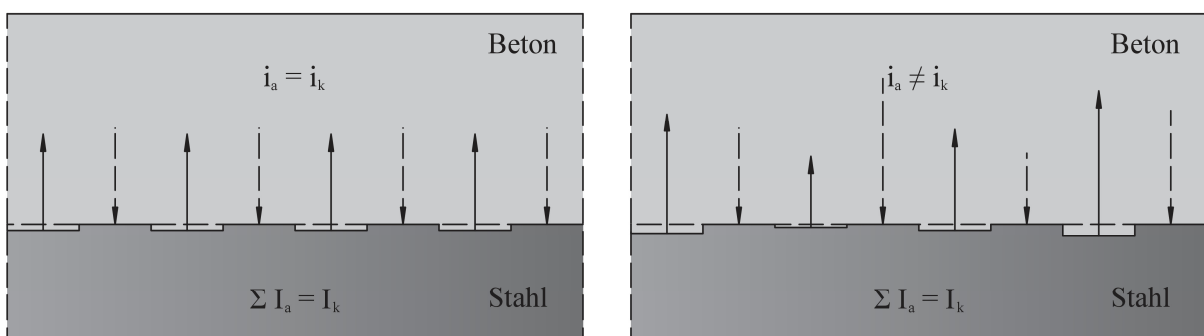


Abb. 1: Korrosionsarten der homogenen Mischelektrode (links) und heterogenen Mischelektrode (rechts) mit Teilstromdichten i und Summenströmen I in Anlehnung an [22] und [30]

2.1.3 CHLORIDINDUZIERTE KORROSION

Bei der chloridinduzierten Korrosion findet ein Angriff der Bewehrung durch Anwesenheit von Chloridionen (Cl^-) statt. Die Herkunft der Chloridionen kann dabei vielfältig sein. Meist findet ein nachträglicher Eintrag über Taumittel oder in Küstenregionen durch Meerwasser statt. Der Eintrag von Chloriden kann dabei besonders schnell in Rissen im Betonbauteil durch Konvektion stattfinden. Über das Porengefüge des Betons kann allerdings auch im ungerissenen Bereich ein Chlorideintrag über Konvektion und Diffusion erfolgen. Die Diffusionsvorgänge werden dabei in der Literatur vereinfachend meist über das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz beschrieben [25, 26, 31], nach dem sich die Eindringgeschwindigkeiten ableiten lassen. Die möglichst genaue Beschreibung des Chlorideindringens in Beton gab bereits Anlass für viele Forschungsarbeiten [32–36].

Der entscheidende Unterschied von chloridinduzierter Korrosion im Vergleich zur carbonatisierungsinduzierten Korrosion ist die Fähigkeit der Chloridionen, eine lokale Depassivierung der Bewehrung hervorzurufen. Der lokale Durchbruch der Passivschicht des Stahls führt zu einer Makroelementbildung mit einer meist ausgeprägten Lochnarbenbildung. Diese Lochkorrosion kann, wie in **Abb. 2** dargestellt, aufgrund des kleinen Anoden- zu Kathoden-Verhältnisses in kurzen Zeiträumen zu deutlich stärkeren Querschnittsverlusten als bei flächigen Korrosionsereignissen führen [37, 38]. Insbesondere in Rissen ist die Abtragsrate und damit die Schädigungsgeschwindigkeit besonders hoch [15]. Dadurch bedingt kann die Tragfähigkeit des Bauteils auch bei kleinen Gesamtmasseverlusten an der Bewehrung massiv beeinträchtigt werden. Die Schädigung zeigt sich dabei nicht zwingend an der Betonoberfläche in Form von Rissbildung oder Abplatzungen, sondern kann lange Zeit unentdeckt im Bauteil ablaufen, was die Lochkorrosion so gefährlich macht [39].

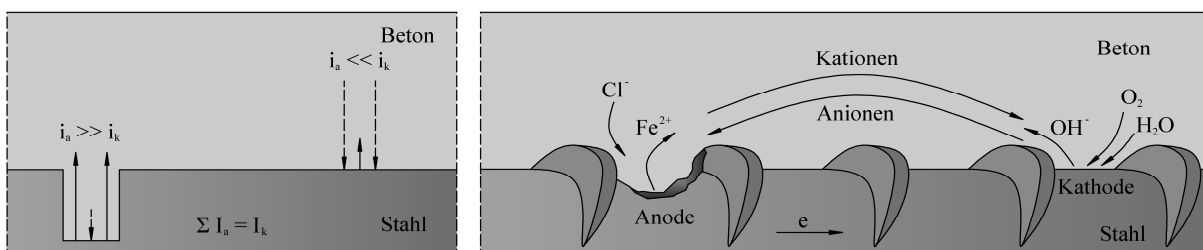
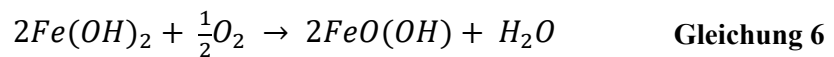
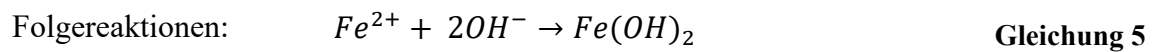
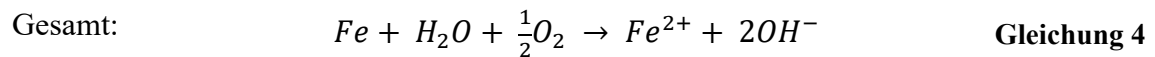
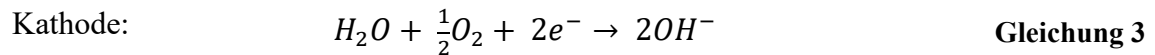
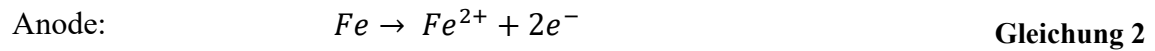


Abb. 2: Ausgeprägte Makroelementbildung: Links mit Teilstromdichten i und Summenströmen I ; rechts: vereinfachte Darstellungen der elektrochemischen Vorgänge chloridinduzierter Korrosion an Bewehrungsstahl in Anlehnung an [22]

An der Anode findet eine Oxidation des Eisens statt, wodurch dieses als Ion in Lösung geht. Außerhalb der Lochnarbe stellt sich eine Kathodenreaktion des Sauerstofftyps ein, die analog der carbonatisierungsinduzierten Korrosion verläuft und nachfolgend vereinfacht dargestellt ist:



Im Lochgrund wandelt sich bei hohen Abtragsraten der Angriffsmechanismus zunehmend in Richtung des Wasserstofftyps, der mit einer Ansäuerung wie in **Abb. 3** verbunden ist, die eine Absenkung des pH-Werts auf $pH \leq 5$ bewirkt.

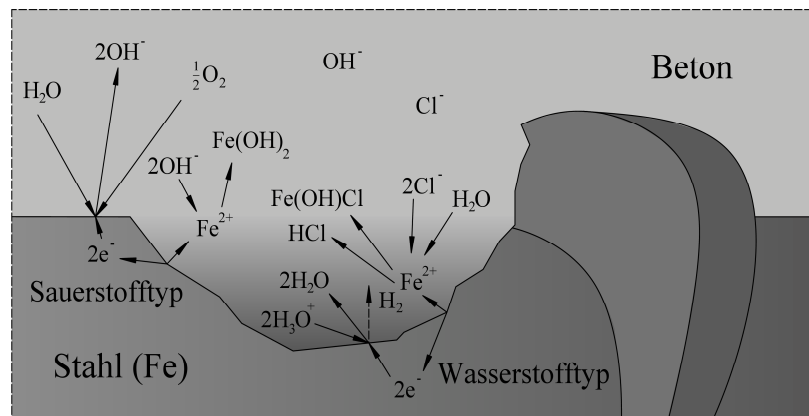


Abb. 3: Schadensmechanismus chloridinduzierter Korrosion in Anlehnung an [12]

Vereinfacht unterliegt der Angriffsmechanismus des Wasserstofftyps folgendem Reaktionsprozess nach [12]:

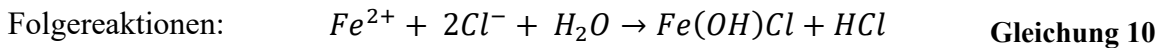
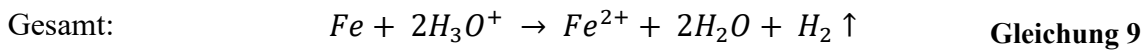
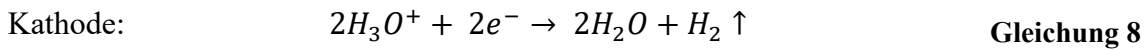
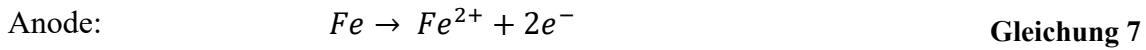


Abb. 4 zeigt ein Beispiel chloridinduzierter Korrosion an der Längsbewehrung einer Stütze im Sockelbereich zum Fundament einer ursprünglich gepflasterten Tiefgarage.



Abb. 4: Chloridinduzierte Korrosion an Stützenlängsbewehrung während Abtragsarbeiten des chloridbelasteten Betons mittels Höchstdruckwasserstrahlen im Zuge einer konventionellen Instandsetzung [eigene Fotos].

Für den kritischen Chloridgehalt existieren mehrere mögliche Definitionen nach [40]. Bei Laborversuchen wird dabei meist der Begriff „kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt“ herangezogen, der auch die gängigste Interpretation darstellt [41, 42]. Dabei handelt es sich um den Chloridgehalt, der im Beton auf Höhe der Bewehrung vorherrschen muss, damit eine Depassivierung der Stahloberfläche eintritt und somit eine Eisenauflösung stattfinden kann [40]. Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt ist kein einheitlich fester Grenzwert [43]. Dies liegt insbesondere auch an den vielen Einflussfaktoren [44]. *Wiens* [45] ermittelte kritische Chloridgehalte im Bereich von 0,2 - 1,0 M.-%/z. *Breit* [43] stellte beginnende Lochkorrosion mit starker künstlicher Polarisation (+500 mV vs. SHE) im Bereich von 0,2 - 0,75 M.-%/z fest.

Nach Ergebnissen von *Harnisch und Raupach* [46] ergeben sich bei geringer Polarisation mit Chloridgehalten von 0,5 M.-%/z Depassivierungswahrscheinlichkeiten von rd. 2 %, die deutlich unkritischer als die Werte von *Breit* [43] liegen. In [41] wurden diverse Literaturergebnisse zusammengestellt. Sobald eine Rissbildung im Betonbauteil hinzukommt, wird die Datenlage deutlich dünner. Aus Untersuchungen in [47] zu hochlegierter, korrosionsträger Bewehrung ergeben sich bei Vergleichsversuchen an B500B-Proben bereits Korrosionsinitiierungswahrscheinlichkeiten von rd. 10 % bei Chloridgehalten von knapp über 0,2 M.-%/z und Rissbreiten von rd. 0,3 mm, vgl. **Abb. 5**.

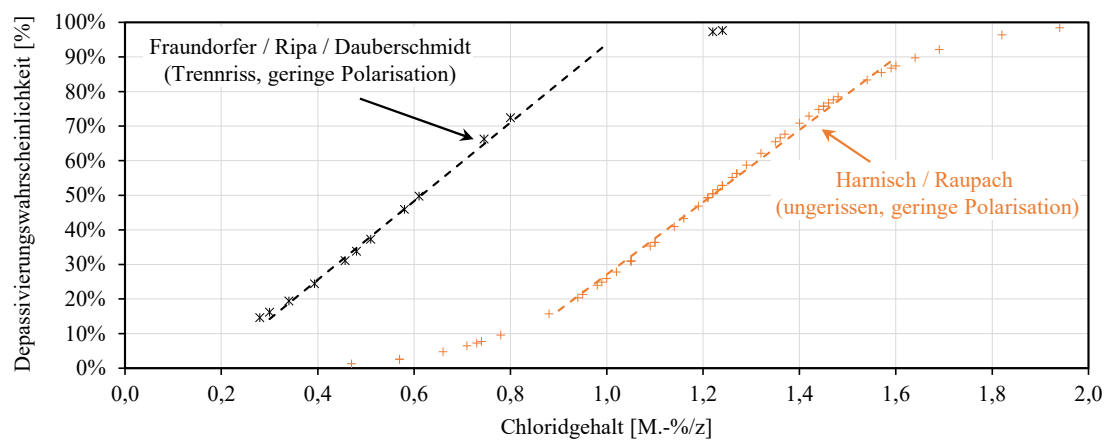


Abb. 5: Vergleich von Depassivierungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Chloridgehalts an Bewehrungsstahl; Ergebnisse aus *Fraundorfer et al.* [47] im Trennrissbereich von Beton und *Harnisch und Raupach* [48] in ungerissenem Beton bei vergleichbaren Polarisationen; Ansatz als Normalverteilung.

Für ungerissenen Beton wird in den Regelwerken *RL-SIB* [5] und *TR Instandhaltung* [1] vereinfachend festgelegt, dass ab einem Chloridgehalt von 0,5 M.-%/z ein Sachkundiger Planer hinzugezogen werden soll, der das Korrosionsrisiko bewertet. Dieser Chloridgehalt wird in der Praxis als unterer Grenzwert für eine chloridinduzierte Korrosion angesehen. Tatsächlich können vereinzelt in der Praxis auch bei weitaus höheren Chloridgehalten keine sichtbaren Korrosionserscheinungen an der Bewehrung auftreten. Dies liegt mitunter an der Abhängigkeit des kritischen Chloridgehalts von der Hydroxidionenkonzentration (OH^-), wobei mit höherer Alkalität die Korrosionswahrscheinlichkeit bei gleichem Anteil freier Chloride sinkt [49]. Mögliche Angriffsmechanismen, die zum Einbruch der Passivschicht durch aggressive Ionen führen können, sind in *Jayalakshmi und Muralidharan* [17] dargestellt und in *Dauberschmidt* [50] anhand verschiedener Quellen genauer erläutert.

Für Korrosionsuntersuchungen im Labor werden die gewünschten Chloridgehalte im Beton häufig mittels Direktzugabe, durch Lösung von Salz im Anmachwasser, eingestellt. Dies führt aber zu einem abweichenden Zementsteingefüge [51] am Stahl, verglichen zu einer Chloridbelastung, die in der Praxis nachträglich durch Diffusion entsteht. Die Ausbildung der Passivschicht kann durch die Direktzugabe von Chloriden behindert sein [52, 53]. Ein Teil der Chloride kann durch die Tricalciumaluminatphasen (C3A) des Zements maßgeblich als Friedelsches Salz gebunden werden [54, 55] und ist damit nicht mehr korrosionswirksam. C3A-arme Zemente führen demnach zu niedrigeren kritischen Chloridgehalten [56–58]. Die Art des verwendeten Auftausalzes hat ebenfalls Auswirkungen auf das Chloridbindevermögen. CaCl_2 führt im Vergleich zu NaCl zu einem höheren Anteil gebundener Chloride [59].

2.1.4 FEUCHTESORPTION VON BETON

Die vorhandene Feuchtigkeit u im Beton stellt für die Korrosion des Bewehrungsstahls eine der wichtigsten Einflussgrößen dar. Über die Porenstruktur des Betons werden abhängig vom Porenwassergehalt und den darin befindlichen Ionen die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons und damit auch die Geschwindigkeit der Korrosion maßgeblich beeinflusst. Das Wasser ist, wie in **Kapitel 2.1.3** beschrieben, zudem auch direkt an den Korrosionsreaktionen beteiligt.

Die Feuchtesorption, auch Wasserdampfsorption (nachfolgend Sorption), von Beton beschreibt die Anreicherung von Wasser an der Phasengrenze des Betons. Das Sorptionsverhalten bei Beton wird über Sorptionsisothermen beschrieben, die bei konstanter Temperatur den Feuchtegehalt u des Betons bei einer relativen Luftfeuchtigkeit φ unter Gleichgewichtsbedingungen darstellen. Dabei unterscheidet man zwischen Feuchteaufnahme (Adsorption) und Feuchteabgabe (Desorption) des Betons [60, 61].

Abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit, die den Beton umgibt, stellt sich über die Zeit ein Gleichgewichtszustand des Wasserbindevermögens ein. Die Sorption ist dabei stark vom Porensystem und damit der Betonzusammensetzung beeinflusst, wobei sich die Betonbauteile im Inneren über lange Zeiträume betrachtet an die mittleren relativen Luftfeuchten annähern und nur noch die äußere Randzone größeren Schwankungen unterliegt [62]. Bei der Adsorption sind die Ausgleichsfeuchtegehalte kleiner als bei der Desorption [63]. Diese sogenannte Hysterese verschwindet mit zunehmendem Chloridgehalt im Beton aufgrund der Hygroskopizität

der vorhandenen Salze. Durch höhere Chloridgehalte besitzt ein Beton bei ansonsten identischer Zusammensetzung auch höhere Feuchtegehalte in der jeweils betrachteten Umgebungsluft [64]. In **Abb. 6** ist dieses Verhalten dargestellt.

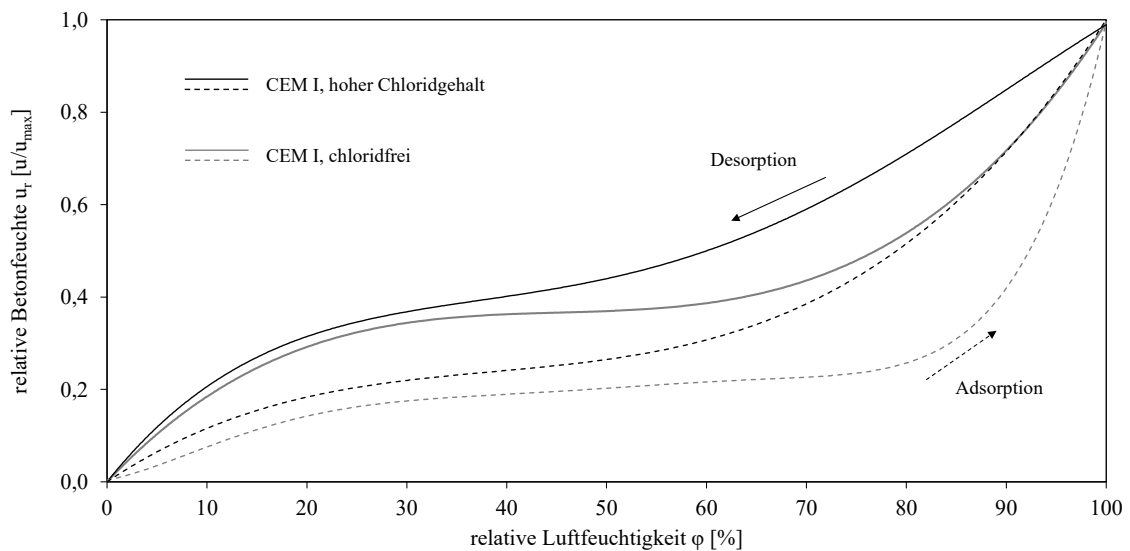


Abb. 6: Schematische Darstellung von hygrischen Desorptions- und Adsorptionsisothermen bei chloridhaltigem und chloridfreiem Beton [eigene Darstellung].

Die Kenntnis der Sorptionsisothermen der untersuchten Betone ist – zur Untersuchung möglichst stationärer Feuchtezustände – für die Eigenkorrosionsanteile im Rahmen dieser Arbeit essentiell. Da sich diese Arbeit aber vorrangig mit Korrosionsmechanismen befasst und über die detaillierten Mechanismen zwischen Adsorption und Desorption bereits eine Vielzahl an Untersuchungen und Veröffentlichungen existieren, wird an dieser Stelle für eine genauere Beschreibung auf Literaturstellen verwiesen [60, 62–75]. Ergebnisse zu den Sorptionsisothermen und spezifischen Elektrolytwiderständen aus **Kapitel 5.2** wurden bereits in [76] veröffentlicht. Dort können ebenfalls genauere Beschreibungen zur Wirkungsweise der Sorption nachgelesen werden.

2.1.5 KORROSIONSSYSTEM

Für die Beschreibung des Korrosionssystems wird nachfolgend speziell auf die Makroelementkorrosion eingegangen, da diese für chloridinduzierte Korrosion im Rahmen dieser Arbeit die maßgebende Rolle spielt. Um die Phänomene der Korrosion besser beschreiben zu können und auch eine Übertragbarkeit für die elektrochemischen Untersuchungen schaffen zu können, lässt sich das System der Makroelementbildung nach *Raupach* [22] in das Ersatzschaltbild aus **Abb. 7** übertragen, das an das Ohmsche Gesetz aus **Gleichung 11** angelehnt ist, welches die Grundlage für die mathematische Beschreibung der meisten Korrosionsprozesse ist.

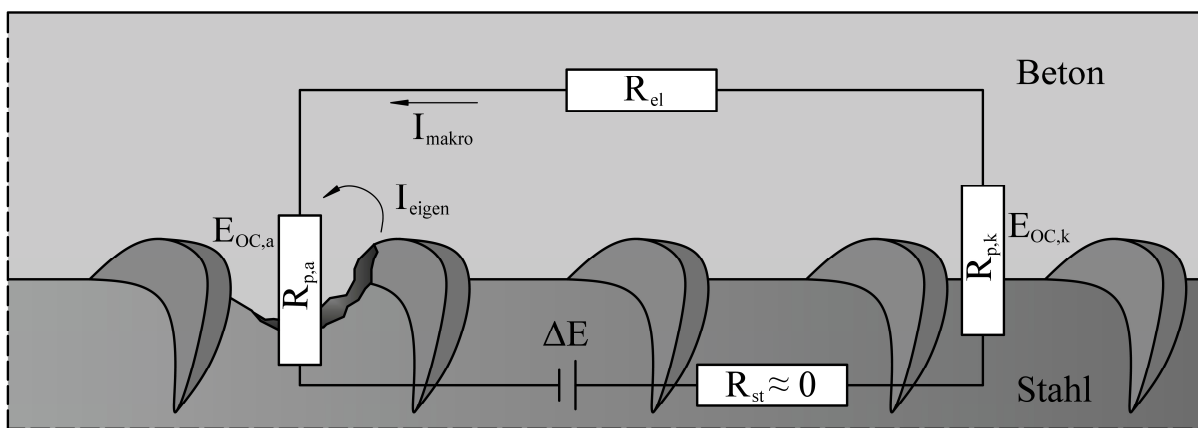


Abb. 7: Makroelement von Bewehrungsstahl in Beton bei chloridinduzierter Korrosion in Anlehnung an [22]

$$I = \frac{U}{R} \qquad \text{Gleichung 11}$$

I	Strom	[A]
U	Spannung	[V]
R	Widerstand	[Ω]

Das Ersatzschaltbild verdeutlicht die Vielzahl an Einflussgrößen, die für die Makroelementbildung von Bedeutung sind. Untersuchungen von [12, 13, 15, 22, 77] liefern außerdem Informationen zum zeitabhängigen Verhalten der Einzelparameter aus nachfolgender **Gleichung 12** und **Gleichung 13**.

$$I_{korr} = I_{makro} + I_{eigen} \quad \text{Gleichung 12}$$

$$I_{makro} = \frac{\Delta E}{R_{p,a} + R_{p,k} + R_{el}} = \frac{E_{OC,k} - E_{OC,a}}{R_{p,a} + R_{p,k} + R_{el}} \quad \text{Gleichung 13}$$

I_{korr}	Korrosionsstrom	[A]
I_{makro}	Makroelementstrom	[A]
I_{eigen}	Eigenkorrosionsstrom	[A]
ΔE	Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode (Treibspannung)	[V]
$E_{OC,a}$	freies Korrosionspotential der Anode	[V]
$E_{OC,k}$	freies Korrosionspotential der Kathode	[V]
$R_{p,a}$	Polarisationswiderstand der Anode	[Ω]
$R_{p,k}$	Polarisationswiderstand der Kathode	[Ω]
R_{el}	Elektrolytwiderstand des Betons	[Ω]
R_{st}	elektrischer Widerstand des Stahls (≈ 0)	[Ω]

Durch die lokale Zerstörung der Passivschicht verschiebt sich das freie Korrosionspotential der Anode $E_{OC,a}$ in negative Richtung. Der Polarisationswiderstand der Anode $R_{p,a}$ ist im Vergleich zum Polarisationswiderstand der Kathode $R_{p,k}$ (passive Bereiche) kleiner, sofern die Werte spezifisch, also flächenbezogen, betrachtet werden. Das bedeutet: eine kleinere Potentialverschiebung führt zu einer größeren Stromdichte an dieser Stelle, was sich in höheren Korrosionsraten widerspiegelt. Absolut betrachtet ist der Polarisationswiderstand der Kathode $R_{p,k}$ üblicherweise jedoch kleiner als der Polarisationswiderstand der Anode $R_{p,a}$, da bei der Makroelementbildung an Bewehrung eine kleine Anodenfläche meist einer sehr großen Kathodenfläche gegenübersteht. Die Potentialdifferenz ΔE zwischen Anode $E_{OC,a}$ und Kathode $E_{OC,k}$ ist die Treibspannung des Korrosionsprozesses. Der zu diesem Zeitpunkt der Schädigung ablaufende Mechanismus ist mit einer Bimetallkorrosion vergleichbar, wobei die Anode das unedlere Metall und die Kathode das edlere Metall darstellt. Der Stahl besitzt in diesem System einen vernachlässigbar kleinen Widerstand R_{st} . Der Elektrolytwiderstand R_{el} hingegen kann das Korrosionsgeschehen deutlich beeinflussen. Insbesondere wenn die Feuchtigkeit im Bauteil abnimmt, erhöht sich R_{el} , was den Ladungsübergang von Anode zu Kathode im Elektrolyten deutlich verlangsamt. Aus **Gleichung 13** ist ersichtlich, wie sich die Einzelwiderstände mit der Potentialdifferenz aus Anode und Kathode nach dem Ohmschen Gesetz zu einem Makroelementstrom I_{makro} verrechnen lassen.

In der Regel wird bei Korrosionsuntersuchungen angestrebt, I_{kor} messtechnisch möglichst genau zu erfassen. Für die Bestimmung von I_{kor} ist allerdings eine örtlich exakte, elektrische Trennung von Anode und Kathode nötig, die versuchstechnisch nie ideal gelingt, sondern immer nur näherungsweise. Dazu wird ein hauptsächlich anodisch wirksamer Stahlbereich separiert, der als Messanode dient. Der hauptsächlich kathodisch wirkende Teil wird als Messkathode verwendet. Der elektrochemisch erfassbare Strom ist der Makroelementstrom I_{makro} zwischen Messanode und Messkathode. Dieser lässt sich mit dem Faradayschen Gesetz in einen elektrochemisch errechneten Masseverlust nach **Gleichung 14** überführen, die bereits auf die nachfolgend verwendeten Indizes angepasst ist.

$$\Delta m_{\text{makro}} = \frac{M}{z \cdot F} \cdot \int_{t=0}^t I_{\text{makro}}(t) \cdot dt \quad \text{Gleichung 14}$$

Δm_{makro}	elektrochemisch ermittelter Masseverlust des Metalls	[kg]
M	molare Masse des Metalls (Eisen: $55,845 \cdot 10^{-3}$)	[kg/mol]
z	Ladungszahl des Metallions (2; Fe^{2+})	[-]
F	Faraday-Konstante = 96.485	[As/mol]
I_{makro}	Makroelementstrom	[A]
t	Zeit	[s]

Bei Korrosionsuntersuchungen von Stahl in chloridhaltigem Beton wird versucht, die Lochkorrosion möglichst gezielt zu untersuchen. Als zusätzliches Phänomen tritt oft Spaltkorrosion auf, siehe beispielsweise [12, 13]. Diese ist bei den Untersuchungen unerwünscht und ergibt sich oft im Bereich von Isolierungen der Kontaktstellen oder durch Luftsackbildung des Betons an den Messanoden, wodurch sich die ermittelten Eigenkorrosionsanteile meist erhöhen.

Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Korrosionsbegriffe lässt sich unter anderem in DIN 4088 [16], sowie [22, 78] nachlesen. Das Ruhepotential (homogene Mischelektrode) und das freie Korrosionspotential (heterogene Mischelektrode) lassen sich nicht immer klar voneinander abgrenzen. Nachfolgend wird der Begriff freies Korrosionspotential verwendet und abgeleitet aus OCP (Open Circuit Potential) unter dem Symbol E_{OC} mit einem Bezugsindex auf Messanode oder Messkathode aufgeführt. Beide Varianten beziehen sich auf den aufgetrennten Stromkreis zwischen Messanode und Messkathode (nach außen hin stromlose Elek-

troden) [13, 16]. Die Potentialermittlung im Kurzschluss Messanode zu Messkathode wird nachfolgend als Korrosionspotential E_{korr} bezeichnet.

2.1.6 EIGENKORROSION

Wie aus dem Makroelement aus **Abb. 2** in **Kapitel 2.1.3** hervorgeht, findet auch ein Teil der Kathodenreaktion in und nahe der Lochnarbe selbst statt. Diese Korrosion bewirkt den Eigenkorrosionsstrom I_{eigen} , der elektrochemisch nicht messbar ist. Bei Korrosionsuntersuchungen von Bewehrungsstahl in Beton ist die Anodengröße nicht unendlich klein wählbar. Der durch I_{eigen} hervorgerufene Eigenkorrosionsanteil ergibt sich aus der Abweichung der elektrochemisch ermittelten Masseverluste, die aus I_{makro} und dem Faradayschen Gesetz ermittelt werden, zu den tatsächlichen, gravimetrisch bestimmbaren Masseverlusten nach Ausbau der Messanoden. Der Eigenkorrosionsanteil ist, wie *Beck* [12] gezeigt hat, von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängig. Gänzlich ausschließen lässt sich Eigenkorrosion nicht, weshalb man diese auch als einen durch das Messsetup reduzierbaren, aber nicht vollständig vermeidbaren Messfehler interpretieren kann.

Zur Eigenkorrosion von Stahl in Beton gab es bereits mehrere Untersuchungen. Im Rahmen der Untersuchungen von *Schiegg* [14] zum Monitoring von Praxisobjekten (chloridexponierte Brücken- und Galeriebauwerke) ergaben sich keine erkennbaren Einflüsse der Korrosionsgeschwindigkeit auf den Eigenkorrosionsanteil. Dort werden allerdings Parameter aufgezeigt, die Einfluss auf den Eigenkorrosionsanteil haben. Größere Messanoden, kleinere Kathodenflächen, zunehmende Anoden-Kathoden-Abstände, kleinere Anteile geschädigter Oberflächen auf der Messanode, höhere Korrosionsaktivitäten an den Bewehrungsbereichen, die als Messkathode um die Messanode herum dienten, sowie höhere Betonwiderstände führten zu einer Zunahme der Eigenkorrosion. Der letzte Punkt ist dabei insbesondere für diese Arbeit relevant.

Hinsichtlich der bereits vorliegenden Untersuchungen wird im Rahmen dieser Arbeit maßgeblich ein großes Forschungsprojekt der DFG-Forschergruppe 537 „*Modellierung des Schadensfortschritts bei Korrosion von Stahl in Beton und Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Dauerhaftigkeit*“, das von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) finanziert und im Zeitraum 2004 bis 2010 durchgeführt wurde, als Referenz herangezogen. Die Ergebnisse sind

in den zwei *DAfStB-Heften* 601 [79] und 602 [80] erschienen. Daraus gingen drei Dissertationen hervor, die das Thema der Eigenkorrosion umfänglich aufgegriffen haben [12, 13, 81].

Die Eigenkorrosion wurde als „*Korrosion in Abwesenheit großer Kathodenflächen*“ von *Beck* [12] in chloridhaltigen Betonen mittels Polarisationswiderstandsmessung durch einen anodischen, galvanostatischen Puls untersucht. Für eine möglichst gute Abgrenzung der anodischen Bereiche wurden dort kleine Messanoden ($d = 1 = 10 \text{ mm}$) untersucht. Die Polarisationswiderstände wurden über die Stern-Geary-Gleichung nach [82] mit systemspezifischen B-Werten in Korrosionsströme umgerechnet und nach dem Faradayschen Gesetz in Masseverluste übertragen. Dabei ergaben sich notwendige Anpassungen der B-Werte aus der Literatur, die aus Stromdichte-Potentialkurven abgeleitet wurden. Die Versuche von *Beck* [12] waren als detailliertere Beschreibung der Eigenkorrosionsprozesse zu den Makroelementen, wie diese in Teilprojekt A1 in *Heft 601* [79] verwendet wurden, gedacht.

Für die Praxis im Rahmen eines Monitorings am Bauwerk relevanter ist jedoch die separate Erfassung des Makroelementstroms, wie dies an Stahlbetonplatten mit eingebauten Messanoden in chloridhaltigem Beton und Bewehrungsstahlkathoden in chloridfreiem Beton in Teilprojekt A1 [79] und Teilprojekt A2 [79] durchgeführt wurde. Dazu wurden die Eigenkorrosionsanteile von *Harnisch* [13] in Teilprojekt A2 [79] an 50 mm langen Messanoden mit $d = 10 \text{ mm}$ in chloridhaltigen Betonen durch Elementstrommessung zu einer Kathodenanordnung aus Bewehrungsstählen in chloridfreiem Beton an Platten gemessen. Ergebnisse der Untersuchungen waren starke Abhängigkeiten des Eigenkorrosionsanteils von vorherrschenden Chloridgehalten und der Betonzusammensetzung. Insgesamt lagen die überwiegend ermittelten Eigenkorrosionsanteile bei maximal 50 %, was einer Abweichung der elektrochemisch ermittelten Masseverluste von den tatsächlichen Masseverlusten um einen Faktor 2 entspricht. Die Chloridgehalte der untersuchten Betone waren dabei relativ hoch ($> 3 \text{ M.-%/z}$) und die Auslagerung erfolgte bei feuchten Umgebungsbedingungen. *Harnisch* [13] verwies auch darauf, dass die Ergebnisse vom jeweiligen Versuchssetup abhängig sind.

In Teilprojekt A1 [79] ergaben sich je nach Betonrezeptur und untersuchter Randbedingung auch Eigenkorrosionsanteile von über 90 %. Das bedeutet, dass nur noch weniger als rd. 1/10 des Korrosionsstroms messtechnisch erfasst wird. Diese hohen Eigenkorrosionsanteile waren jedoch zunehmend mit kleineren gesamten Masseverlusten begleitet. Hierbei waren relative

Luftfeuchten von $\varphi = 85\%$ und $\varphi = 50\%$, sowie Chloridgehalte von 1 M.-%/z und 4 M.-%/z in die Betrachtungen integriert. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Probenfeuchten bei den betrachteten Platten über den Zeitraum der Untersuchungen deutlich über deren Ausgleichsfeuchten lagen.

Osterminski [81] überführte die entstandenen Eigenkorrosionsanteile, die sich prozentual als Abweichung der gemessenen Makroelementströme zu den gravimetrischen Masseverlusten der Messanoden in Teilprojekt A1 [79] und A2 [79] darstellten, in Eigenkorrosionsfaktoren f_{eigen} . Der aus dem gemessenen Makroelementstrom I_{makro} über das Faradaysche Gesetz errechnete Masseverlust, ergibt mit dem Eigenkorrosionsfaktor multipliziert den gravimetrisch ermittelten, tatsächlichen Korrosionsabtrag. Bei Teilprojekt A1 [79] (hohe Probenfeuchte und Chloridgehalte) ergaben sich im Mittel Eigenkorrosionsanteile von 29 %, die einem $f_{\text{eigen}} = 1,41$ entsprechen. Bei Teilprojekt A2 [79] (mäßige Probenfeuchte und Chloridgehalte) lagen die Eigenkorrosionsanteile im Mittel bei 59 %, was einem $f_{\text{eigen}} = 2,46$ entspricht.

Der wissenschaftliche Beitrag, der im Rahmen dieser Arbeit generiert wird, ist als Erweiterung zu den oben genannten Erkenntnissen zu sehen. Der Fokus liegt in der detaillierten feuchteabhängigen Untersuchungsmethodik, die speziell trockene Randbedingungen mit möglichst hoher Präzision erfassen soll. Damit soll der praxisnahe Fall eines Korrosionsmonitorings bei trockenen Betonen, z.B. bei erfolgreicher Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 nach *TR Instandhaltung* [1] abgedeckt werden.

2.1.7 SCHÄDIGUNGSTIEFEN UND QUERSCHNITTSVERLUSTE

Die aus den Korrosionsströmen errechenbaren Masseverluste liefern zwar ein Indiz auf vorhandene Schädigungen, letztendlich ist jedoch bei der Korrosion der Bewehrung der Querschnittsverlust, der daraus resultiert, die entscheidende Größe. Damit einhergehend ergeben sich mögliche Resttragfähigkeiten der korrodierten Betonstähle, die in der Praxis für die Beurteilung der Tragfähigkeit des gesamten Stahlbetonbauteils entscheidend sind.

Der Pittingfaktor dient dazu, dem lokalen Schädigungscharakter der Lochkorrosion Rechnung zu tragen. Die Bestimmung des Pittingfaktors ist in **Abb. 8** und **Gleichung 15** dargestellt.

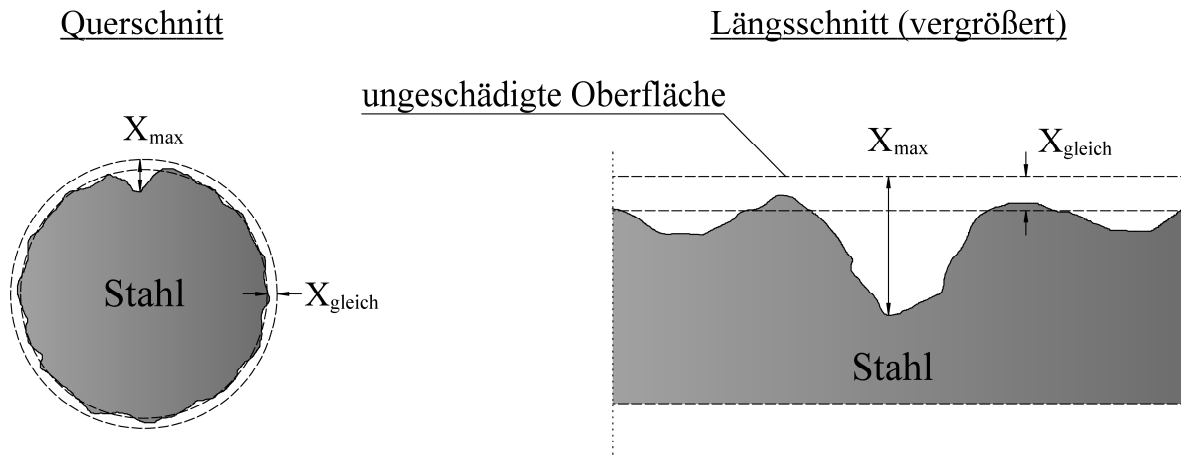


Abb. 8: Pittingfaktor am Beispiel eines idealisierten Bewehrungsstabs ohne Rippen in Anlehnung an [83]

$$\alpha_{pit} = \frac{X_{max}}{X_{gleich}} \qquad \text{Gleichung 15}$$

α_{pit}	Pittingfaktor	[-]
X_{max}	maximale Schädigungstiefe	[m]
X_{gleich}	errechnete Schädigungstiefe bei homogenem Korrosionsabtrag	[m]

Je nach Schädigungsgrad liegen die Pittingfaktoren aus Literaturergebnissen in einem Bereich von rd. 3 bis 18 [84, 85], bei kleinen Schädigungen ergeben sich auch teilweise etwas höhere Faktoren bis rd. 25 [13]. Dabei ergeben sich bei kleineren Gesamtschädigungen in der Regel größere Pittingfaktoren, was auf die meist sehr lokale Ausprägung der Korrosion in der Anfangsphase zurückzuführen ist [13, 86].

Um ermittelte Schädigungstiefen in Berechnungsansätze für Restquerschnitte und demnach Resttragfähigkeiten zu bringen, wurden diverse, teilweise stark vereinfachende Annahmen in Literaturstellen getroffen, die den Restquerschnitt meist nur unzureichend gut abdecken können [87–91].

Untersuchungen aus [25, 85, 92, 93] ergaben erwartungsgemäß eine deutliche Abnahme der Resttragfähigkeit mit steigendem Querschnittsverlust. Betrachtet man die Ergebnisse aus [85] in **Abb. 9**, sieht man, dass die maximal aufnehmbaren Zugkräfte dabei sehr gut mit den Querschnittsverlusten korrelieren, womit die Zugfestigkeit, als maximale Zugkraft bezogen auf den

Restquerschnitt, nahezu identisch bleibt. Deutlich erkennbar ist, dass bereits sehr geringe Querschnittsverluste zu beträchtlichen Einbußen in der Bruchdehnung führen, was sich mit Ergebnissen von *Gehlen* [25] deckt. Die Duktilität des Bauteils kann demnach bereits bei geringen Korrosionserscheinungen bedeutend reduziert sein. Die geringen Abweichungen zwischen Querschnittsverlust und Tragfähigkeitsverlust lassen auch darauf schließen, dass eine topometrische Untersuchung mit einer genauen Vermessung des Restquerschnitts nach [13] die einzig verlässlichen Daten zur Interpretation des Tragfähigkeitsverlusts liefert.

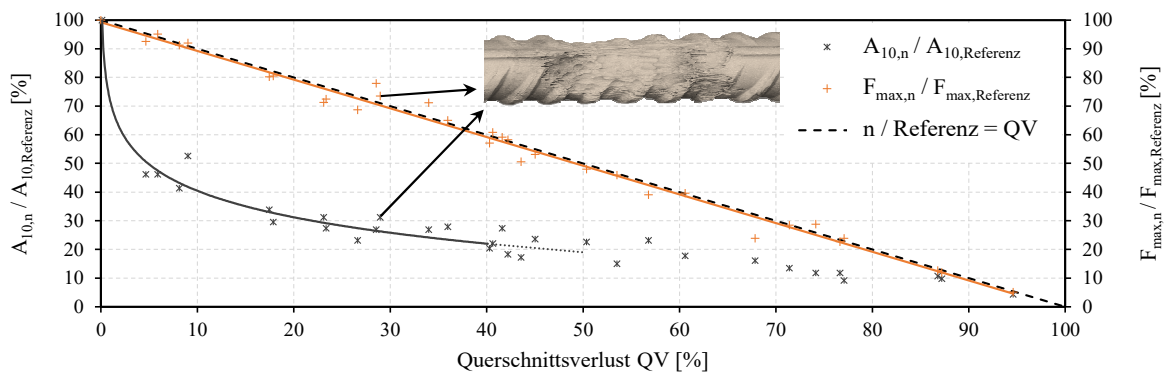


Abb. 9: Gegenüberstellung der maximal aufnehmbaren Zugkräfte F_{\max} und der Bruchdehnungen A_{10} von Betonstählen $d = 12$ mm in Abhängigkeit des Querschnittsverlusts; Einzelwerte n bezogen auf ungeschädigten Referenzquerschnitt; Ergebnisse aus [85]

Wenn auch in [16] nicht explizit erwähnt, wird in Literaturquellen [22, 94] zur Lochkorrosion ebenfalls die Muldenkorrosion genannt. Diese wird als flächiger im Vergleich zur Lochkorrosion und mit weniger ausgeprägten Narbenrändern beschrieben. Als Abgrenzung zu Lochkorrosion wird ein in der Regel größerer Durchmesser, verglichen zur Tiefe beschrieben. Eine eindeutige Abgrenzung erscheint zur Lochkorrosion nicht immer möglich. In *Nürnberger* [95] zeigt sich die Lochmorphologie in Abhängigkeit des Chloridgehalts, wobei kleinere Chloridgehalte zu stärkerer lokaler Einkerbung führen. Dies deckt sich auch mit den errechneten Pittingfaktoren nach [13], wobei sich bei kleineren Schädigungsstadien größere Pittingfaktoren ergeben.

2.2 KORROSIONSMONITORING

Durch die Wahl geeigneter Betonzusammensetzungen und Betondeckungen im Neubau lässt sich die Depassivierung der Bewehrung durch carbonatisierungsinduzierte Korrosion über den Nutzungszeitraum zielsicher verhindern, und die Lebensdauer eines Bauwerks ist durch entsprechende Rechenmodelle gut prognostizierbar. Zur Vermeidung chloridinduzierter Korrosion steigt der dafür erforderliche Aufwand meist erheblich [25]. Eine Prognose des Schädigungsfortschritts bei bereits eingesetzter Depassivierung gestaltet sich als schwierig.

Das Ziel des Korrosionsmonitorings (nachfolgend auch Monitoring genannt) im Stahl- und Spannbetonbau ist die Überwachung und Zustandsentwicklung der Bauteile im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit durch Erfassung korrosionsrelevanter Parameter mit ortsfesten Sensorsystemen. Die Anwendung von Monitoring existiert schon seit langem und Fragestellungen diesbezüglich wurden im Rahmen von einer Vielzahl an Forschungsvorhaben und Dissertationen untersucht [9, 14, 96–106]. Das Monitoring ist aktuell noch nicht normativ geregelt, wird aber im Merkblatt B 12 „Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken“ der DGZfP beschrieben [11]. Durch eine repräsentative Wahl der Lage der Sensoren soll damit der Bauwerkszustand über die Zeit möglichst gut abgebildet werden können. Das Korrosionsmonitoring kann im Neubau wie auch im Bestand Anwendung finden, wobei im Bestand eine ergänzende Bauwerksuntersuchung Voraussetzung ist, um verlässliche Aussagen zum Abnutzungsvorrat tätigen zu können. Möglichkeiten zur Sensorausführung, der Messung, Fehlerquellen, etc. werden in [11] erläutert. In der Schädigungsphase wird häufig angestrebt, durch das Monitoring die Einzelparameter aus eingangs gezeigtem Ersatzschaltbild aus **Abb. 7** in **Kapitel 2.1.5** sowie ergänzende Einflussparameter wie Temperatur und den Feuchtegehalt zu erfassen.

Neben Bauwerksuntersuchungen wie der Betondeckungsmessung nach [107], der Bestimmung des Carbonatisierungsfortschritts nach [108] und der Ermittlung des Chloridgehalts nach [109] über die Bauteiltiefe ist insbesondere eine Potentialfeldmessung mit ortsveränderlichen Referenzelektroden für eine Festlegung der Sensorstellen wichtig. Hierdurch lassen sich Bereiche hoher Korrosionswahrscheinlichkeit am Bauwerk identifizieren. Als Referenzelektroden kommen dabei meist gesättigte Kupfer/Kupfersulfatelektroden (CSE) zum Einsatz. Das Messverfahren ist im Merkblatt B 3 der DGZfP [110] beschrieben. Das Verfahren ist seit Jahren etabliert und wurde bereits im Rahmen von Forschungsarbeiten, wie beispielsweise [111–113]

eingehend untersucht. Eine Einordnung von Bereichen des Korrosionspotentials E_{korr} am Bauwerk nach Umgebungsbedingungen des Bewehrungsstahls ist in Anlehnung an [110] nach [114] in **Abb. 10** gegeben. Dabei ist ersichtlich, welche Schwankungen durch diverse Einflüsse auf die Korrosionspotentiale E_{korr} möglich sind.

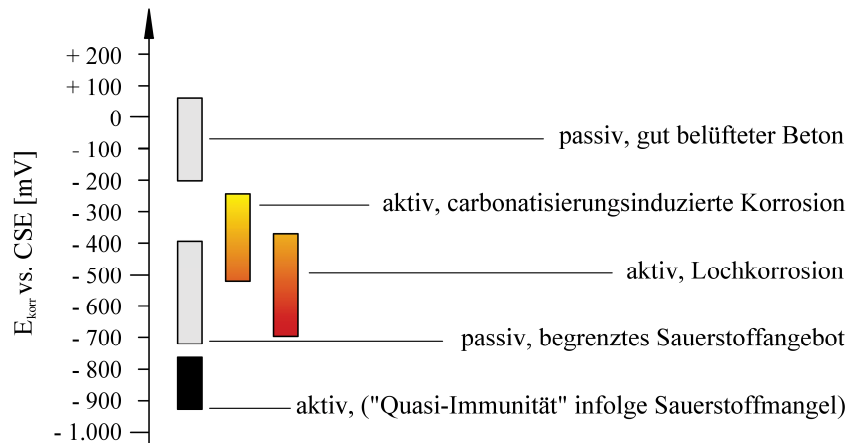


Abb. 10: Bereiche von E_{korr} vs. CSE am Bauwerk in Anlehnung an [110] nach [114]

Sinnvolle Sensoranordnungen in Bestandsbauwerken zu integrieren ist dabei aufwendiger als im Neubau. Während bei Letzterem ein Einbau von fertigen Systemen vor dem Betonieren möglich ist, macht es im Bestand – gerade in der Schädigungsphase – Sinn, vorhandene Bewehrungselemente als Messanoden zur Makroelementstrommessung zu kontaktieren. Alternativ können auch über indirekte Messverfahren wie der Potentialmessung durch fest installierte Referenzelektroden oder der Messung des Elektrolytwiderstands Rückschlüsse auf die Korrosionsprozesse gezogen werden [11]. Die Kontaktierung von Bestandsbewehrung bildet jedoch den Ist-Zustand am Bauwerk deutlich präziser ab. Ein möglicher Aufbau einer Monitoringstelle ist zum besseren Verständnis in **Abb. 11** mit Überlagerung einer Potentialfeldmessung zur Lokalisierung einer geeigneten Messanode und dem Chloridtiefenprofil in diesem Bereich dargestellt.

Über eine Messung der tiefengestaffelten Elektrolytwiderstände über beispielsweise in [11] beschriebene Multiringelektroden, lassen sich Feuchteverteilungen über die Tiefe sowie Korrosionswahrscheinlichkeiten nach [115–117] abschätzen. Bei nachträglichen Sensoreinbauten mit Ankopplungen über separate Mörtelsysteme muss dabei allerdings wie bei den Makrozellensensoren berücksichtigt werden, dass insbesondere auch Anteile des verwendeten Mörtels

mitgemessen werden [11]. Da alle Messwerte für Korrosion auch einer Temperaturabhängigkeit unterliegen, ist eine Temperaturkompensation der gemessenen Werte nach *Arrhenius* [118] über die Zeit nötig, wie sie beispielsweise in *Schiegg* [14] beschrieben ist.

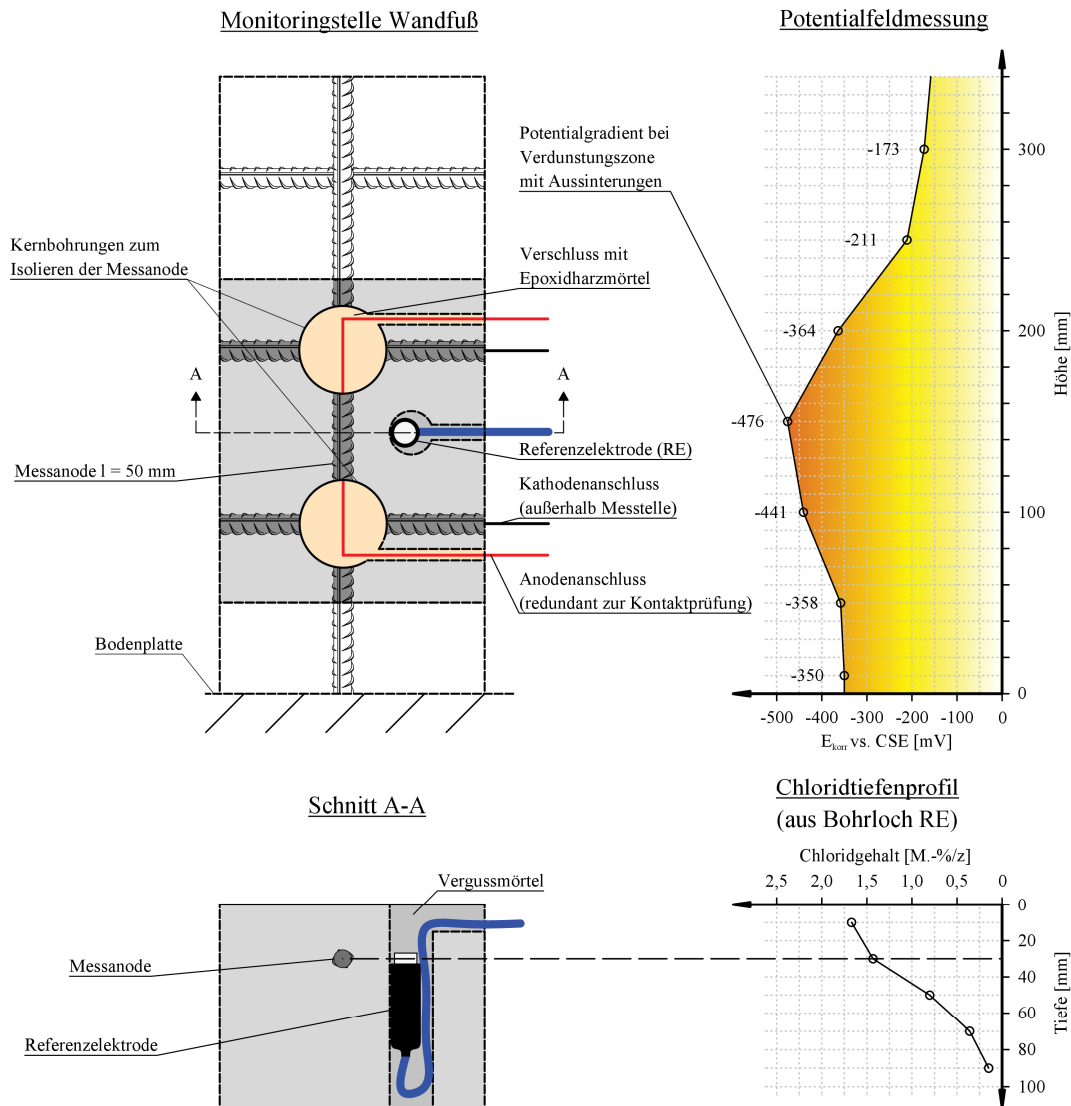


Abb. 11: Exemplarische Monitoringstelle an einem Wandfuß für ungerissenen Beton; Ausführung der Messanode in Anlehnung an [11] und [119]

Messwerte beim Korrosionsmonitoring am Bauwerk zu generieren und zu interpretieren, die den tatsächlichen Korrosionszustand widerspiegeln, ist eine herausfordernde Aufgabe – weitere Forschungsarbeiten sowie neue Erkenntnisse in diesem Bereich sind über die nächsten Jahre fortlaufend zu erwarten. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur besseren Aussagekraft von Monitoringsystemen bei zunehmender Trockenheit liefern.

3 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND VERSUCHSREIHEN

3.1 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Eingangs wurden für die elektrochemischen Untersuchungen relevante Betoneigenschaften detailliert untersucht. Dazu sind mittels **Versuchsreihe A** Sorptionsisothermen, elektrolytische Widerstände und Phasenwinkel ermittelt worden. Durch diese Parameter konnten relevante relative Luftfeuchtigkeiten für die Lagerung der Korrosionsproben, mit den genauen Ausgleichsfeuchtegehalten der Betone unter Desorption, ermittelt werden.

Die **Versuchsreihe B** stellt die Korrosionsversuche dar. Damit wurde die Eigenkorrosion unter definierten Ausgleichsfeuchten während eines Kurzschlusszeitraums von Messanoden und Messkathoden über 12 Monate ermittelt. Um realitätsnahe Anoden aus Stabstahlbewehrung untersuchen zu können, waren die Abmessungen der Betonproben jedoch zu groß, um einen natürlichen Trocknungsprozess bei der jeweiligen Lagerungsfeuchte in einer angemessenen Versuchszeit zu erreichen. Vorab erstellte Referenzproben dienten dafür zur Erstellung von Trocknungskurven, mithilfe derer die Proben aus **Versuchsreihe B** beschleunigt bei 60 °C auf die jeweiligen Ausgleichsfeuchten getrocknet werden konnten. Die künstliche Trocknung führte zu einem anfänglich ungleichmäßigen Feuchteprofil in den Proben, weshalb der Trocknungsphase eine Ruhephase von rd. 10 Wochen in der jeweiligen Lagerungsfeuchte vor dem Beginn der Elementstrommessungen im Kurzschluss voranging.

Bereits nach dem Ende der Ruhephase der Proben und vor Beginn der Elementstrommessungen waren nicht vernachlässigbare Korrosionserscheinungen an den Proben zu erwarten, weshalb jede Probenserie feuchtegestaffelt identische Blindproben besaß. Diese wurden zu Beginn der Elementstrommessungen geöffnet, die Stahlproben gebeizt und rückgewogen. Dadurch konnten die anfänglichen, elektrochemisch nicht nachvollziehbaren Masseverluste quantifiziert werden.

Bei **Versuchsreihe B** wurde zu regelmäßigen Zeitpunkten im Abstand von rd. 2 Monaten der Kurzschluss für einen kurzen Zeitraum unterbrochen, um Zusatzmessungen (freie Korrosionspotentiale $E_{OC,a}$, Polarisationswiderstände $R_{p,a}$, Elektrolytwiderstände R_{el}) an den Proben durchführen zu können.

3.2 BETONREZEPTUREN

Im Rahmen der Versuche wurden Betone mit CEM I- und CEM III/A-Zement und unterschiedlichen Chloridgehalten untersucht, da es sich hierbei um sehr häufig verwendete Zemente und sehr unterschiedliche Bindemittel hinsichtlich der Porenstruktur und damit auch Dichtigkeit handelt. Bei den CEM I-Betonen wurde zusätzlich noch der w/z-Wert variiert, woraus sich in Summe sieben Betonrezepturen ergeben, die in **Tabelle 1** dargestellt sind. Die Betone orientieren sich in der Rezeptur an DIN EN 206-1 [120] und DIN 1045-2 [121]. Der Entwurf erfolgte jedoch nicht anhand von Expositionsklassen, sondern aus der Überlegung heraus, einen Rückschluss zu anderen Untersuchungsergebnissen aus der Literatur zu ermöglichen. Zudem sollten ältere Bestandsbauwerke mit tendenziell höheren w/z-Werten, die aktuell für nachträgliches Monitoring mit aktiver Korrosion relevant sind, mit den Ergebnissen abgedeckt werden. Die Chloridgehalte wurden hierbei mit mindestens 2,5 M.-%/z relativ hoch angesetzt, damit sich auch bei Trockenheit noch eine hohe Wahrscheinlichkeit aktiv ablaufender Korrosionsprozesse ergibt und die Ergebnisse damit auf der sicheren Seite liegen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zu niedrigeren Chloridgehalten kann über Teilprojekt A1 aus *Heft 601* [79] abgeleitet werden.

Die untersuchten Betone sind anhand der Zementart, des w/z-Werts und dem zugesetzten Chloridgehalt bezeichnet. Eine Betonrezeptur mit CEM I-Zement, einem Wasser-Zementwert von $w/z = 0,50$ und einem Chloridgehalt von 2,5 M.-%/z besitzt beispielsweise die Kurzbezeichnung **I/0,5/2,5**.

Zusätzlich wurden alle Proben für die Versuche nach deren Betonrezeptur farbcodiert. Die Farbcodierung diente in erster Linie einer besseren Übersichtlichkeit während der Versuchsdurchführungen. Schalungen, Betonproben, Steckverbindungen etc. wurden hierzu mit farbigen Markierungen versehen. In den Diagrammdarstellungen und Tabellen dieser Arbeit wird die Farbcodierung ebenfalls fortgeführt.

Die genauen Stoffraumrechnungen können **Anhang B, Tabelle B.1 - 1 bis Tabelle B.1 - 3** entnommen werden.

Tabelle 1: Übersicht der Serien und Betonrezepturen

Betonsorte/ Probenserie	Zementart [-]	w/z-Wert [-]	Chloridgehalt* [M.-%/z]	Zementgehalt [kg/m ³]
I/0,5/0	CEM I 42,5 N	0,50	0	380
I/0,5/2,5	CEM I 42,5 N	0,50	2,50	380
I/0,5/4	CEM I 42,5 N	0,50	4,00	380
I/0,6/2,5	CEM I 42,5 N	0,60	2,50	317
III/0,5/0	CEM III/A 32,5 N-LH	0,50	0	380
III/0,5/2,5	CEM III/A 32,5 N-LH	0,50	2,50	380
III/0,5/4	CEM III/A 32,5 N-LH	0,50	4,00	380

* *Eigenchloridgehalte vernachlässigt; Referenzmischungen ohne Chloridzugabe*

Die Chloridzugabe zu den Betonen erfolgte über eine Lösung von Natriumchlorid (Reinheit $\geq 99,0\%$) im Anmachwasser. Alle Betone wurden ohne Zusatzmittel in der Konsistenzklasse F2 hergestellt. Zur Kontrollprüfung der Rezepturen erfolgte am Frischbeton die Bestimmung des Ausbreitmaßes sowie der Frischbetonrohichte und des Luftporengehalts im LP-Topf nach DIN EN 12350 Teil 5 - 7 [122–124]. Bei jeder Mischung wurden drei Würfel mit 100 mm Kantenlänge nach DIN EN 12390-2 [125] hergestellt und nach 28 Tagen (Lagerung: 7 d Wasser, 21 d Laborklima) auf deren Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [126] geprüft. Die Ergebnisse der Siebanalyse nach DIN EN 933-1 [127] sowie der Frisch- und Festbetonuntersuchungen sind in **Anhang B, Tabelle B.1 - 4** und **Tabelle B.1 - 5** ersichtlich.

Die Natriumchloridzugabe führte bei den Proben mit CEM III/A-Zement zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung nach 28 d um bis zu zwei Druckfestigkeitsklassen, vgl. **Anhang B, Tabelle B.1 - 5**. Insbesondere bei der Mischung mit 2,5 M.-%/z ist der Festigkeitsanstieg am deutlichsten erkennbar. Als Abgleich wurde mit der gleichen Zementcharge eine neue Betonmischung mit 2,5 M.-%/z hergestellt und auf deren Druckfestigkeit geprüft, wobei die Ergebnisse reproduzierbar waren und ein Fehler in der Mischungszusammensetzung ausgeschlossen werden kann. Worauf dieses Verhalten zurückzuführen ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Untersuchungen aus [128] ergaben an NaCl-haltigen Zementen jedoch Festigkeitsanstiege, sofern Halit (NaCl) in den Poren kristallisiert und dadurch als Gesteinskörnung wirkt. Dieser Effekt könnte bei dem feineren CEM III/A-Porensystem ausgeprägter sein als bei dem des CEM I-Zements.

3.3 VERSUCHSREIHEN UND PROBEKÖRPER

Die einzelnen Versuchsreihen sind nachfolgend in einer kurzen Übersicht dargestellt. Details zur Probenvorbereitung können den jeweiligen Unterkapiteln zur Versuchsdurchführung in **Kapitel 4** entnommen werden.

Die Proben aus **Versuchsreihe A** (Sorptionsversuche) sind in **Abb. 12** ersichtlich. Die Probenzeichnungen mit Bemaßung sind in **Anhang C.1** dargestellt. Ein Überblick des Versuchsablaufs kann **Abb. 13** entnommen werden.



Abb. 12: Probekörper A; links: Zeichnung, Mitte: Schalung mit Einbauteilen, rechts: fertige Probe mit geschliffener Oberfläche

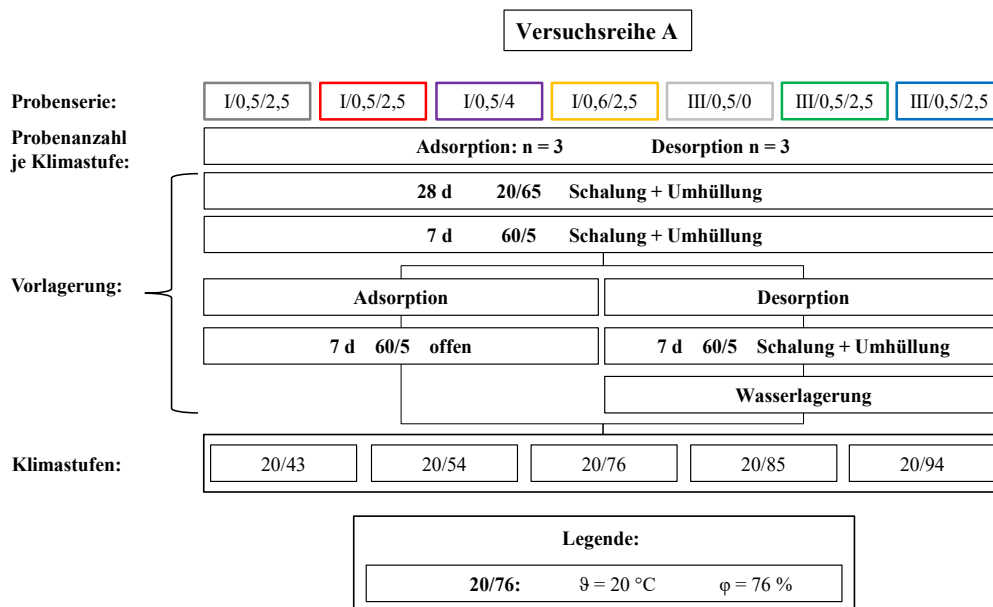


Abb. 13: Übersicht des Versuchsablaufs aus Versuchsreihe A

Die Proben aus **Versuchsreihe B** (Korrosionsversuche) sind in **Abb. 14** zu sehen. Die Probenzeichnungen mit Bemaßung können **Anhang C.2** entnommen werden. Ein Überblick des Versuchsablaufs ist in **Abb. 15** dargestellt.



Abb. 14: Probekörper B; links: Zeichnung, Mitte: Schalung mit Einbauteilen, rechts: fertige Probe

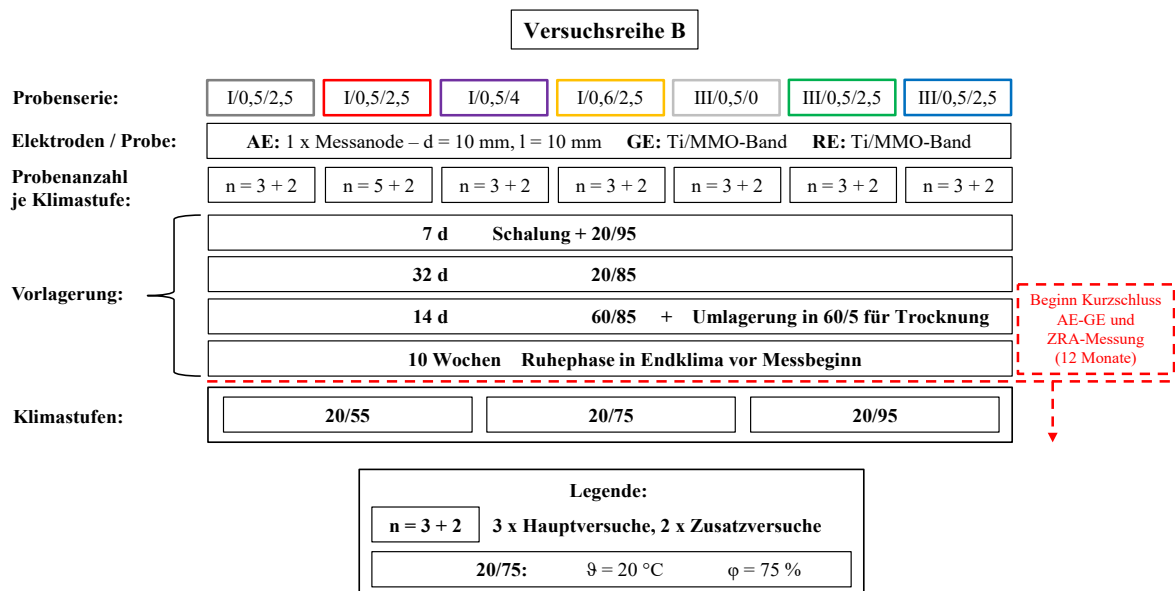


Abb. 15: Übersicht des Versuchsablaufs aus **Versuchsreihe B**

Eine kurze Übersicht über relevante Probenparameter aus **Versuchsreihe B** ist in **Tabelle 2** dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht relevanter Probenparameter aus **Versuchsreihe B**

Art	Korrosionsversuche
Messanode (AE)	Betonstahlanode mit Walzhaut
Messkathode (GE / TiGE)	Ti/MMO-Band
Referenzelektrode (RE / TiRE)	Ti/MMO-Band
Mantelfläche Messanode	3,61 cm ² *
Flächenverhältnis AE / GE	1 / 16
Geometrie / Bemaßung	vgl. Anhang C.2
RE-Abgleich	externe CSE
Vorschädigung Messanoden	Wärmebehandlung
Zeitraum Kurzschluss AE-GE	12 Monate

* inkl. Rippung, anhand Topometrieergebnissen rd. 15 % größere Fläche als Zylinder

Alle Proben wurden in Kunststoffschalungen ohne Verwendung eines Trennmittels hergestellt, um einen Einfluss auf das Sorptionsverhalten der Proben auszuschließen. Alle Elektroden wurden vor dem Einbau mit Aceton, destilliertem Wasser und anschließend Ethanol gereinigt.

3.4 MESSANODEN

Die Ausführung der Messanoden hat eine besonders wichtige Bedeutung für die durchgeführten Untersuchungen zum Eigenkorrosionsanteil. Dabei standen nachfolgend aufgelistete Überlegungen im Vordergrund, die durch die Messanode erfüllt sein sollten:

- Untersuchung von Bewehrungsstählen mit Walzhaut ohne praxisfremde Oberflächen (keine walzhautfreien Stirnseiten oder hochlegierte Edelstahlflächen mit elektrolytischem Kontakt zum Beton).
- Realistische Ankopplungsvariante für Messanoden in Bestandsbauwerken.
- Keine ausgeprägten Kanten oder horizontale Flächen, um Luftsackbildung beim Verdichten zu vermeiden.

- Möglichst genaue Masseermittlung mit geringer Masseverfälschung beim Ausbau nach der Versuchslaufzeit.
- Nahezu ideale elektrische Ankopplung an die Anode mit kleinem Übergangswiderstand.
- Untereinander geometrisch möglichst identische Anoden.
- Möglichst kleine, aber dennoch praxisrelevante Anodenflächen.
- Vermeidung von Spaltkorrosion.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde die Bewehrungsstahlanode aus **Versuchsreihe B** entwickelt, vgl. **Abb. 16**. Die Messanode ist eine Hybridvariante aus verschiedenen Aufbauten, die in anderen Forschungsarbeiten verwendet wurden [12, 129, 130].

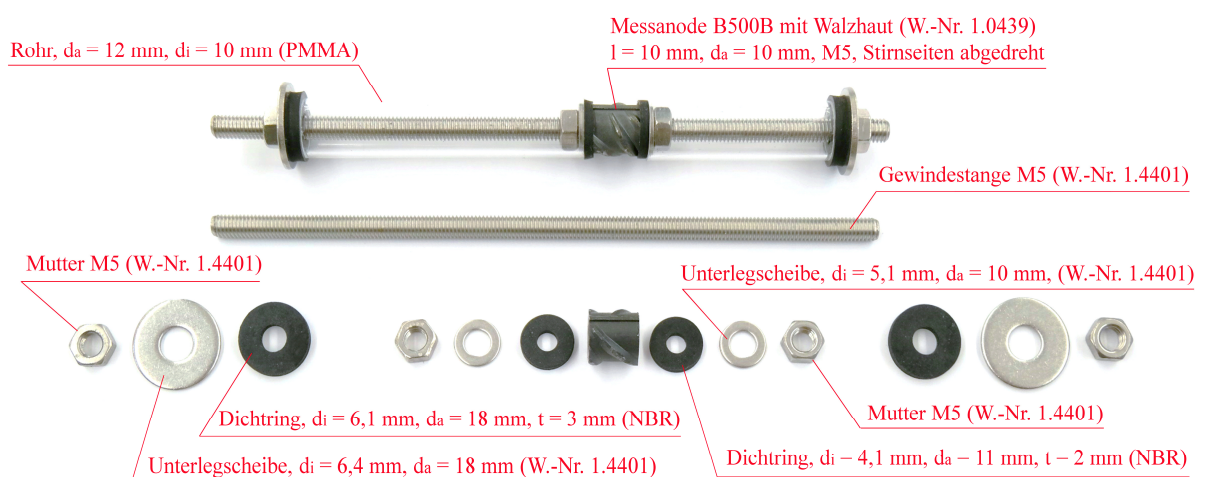


Abb. 16: Bewehrungsstahlanode mit Aufbau – **Versuchsreihe B**

Die Acrylglasrohre konnten press auf die Beilagscheiben an der Messanode gesteckt werden und ergaben dadurch einen bündigen Anschluss an die Dichtflächen. Zur Vermeidung eines Lösens der Muttern beim Verdichten wurden diese mit einem Tropfen Schraubensicherungslack geschützt. Im Rahmen von Vorversuchen wurden diverse Dichtungsmaterialien und -größen ausgetestet und nach jeweils rd. 3 Wochen geöffnet. Der in **Abb. 16** verwendete Aufbau konnte nach den Vorversuchen alle oben genannten Bedingungen erfüllen und stellt eine mögliche Kontaktierung nach Kapitel 7.3.2 des Merkblatts B 12 der DGZfP [11] bei Monitoring im Bestand dar.

Trotz der anfänglich guten Ergebnisse bei den Vorversuchen zeigten sich nach dem Ausbau der Blindproben bei den Bewehrungsstahlanoden Spaltkorrosionsphänomene unter der Dichtfläche, die bei weiteren Untersuchungen auch ohne Wärmebehandlung nach mehreren Wochen Laufzeit entstanden sind. Spaltkorrosion ergab sich auch in anderen Arbeiten, die sich mit der Untersuchung von Eigenkorrosion befassten. Von *Harnisch* [13] wurden die Kontaktstellen der Messanoden mit Epoxidharz abgedichtet und im Übergangsbereich zum chloridbelasteten Beton mit einem Pufferbereich aus mineralischem Korrosionsschutz unter einem Schrumpfschlauch verwahrt, wobei sich ebenfalls teilweise Spaltkorrosion abzeichnete. *Beck* [12] untersuchte vorab zu seinen Hauptproben diverse Isolierungen der Übergangsstellen an einem Aufbau nach [131]. Mit Abdeckband und galvanischem Abdecklack ergaben sich analog zu alkalischen Pufferschichten Spaltkorrosionsphänomene im Übergangsbereich zur freien Stahloberfläche. Die Kontaktierung wurde dort letztendlich über WIG-Schweißdrähte (W.-Nr. 1.4370) gelöst, die mittels eines kurzen Impulses an die Messanoden geschweißt wurden. An den zylindrischen Messanoden konnte dadurch im Übergangsbereich zur Schweißstelle Spaltkorrosion vermieden werden, diese ergab sich jedoch in einem Sackungsspalt an der Stirnseite der Messanode und konnte nur durch Verwendung von kegelförmigen Messanoden umgangen werden.

Spaltkorrosion ist demnach bereits in Laborversuchen schwer vermeidbar. An Bauwerken wird bei Kontaktierung von Bestandsbewehrung als Messanode beim Korrosionsmonitoring das Auftreten von Spaltkorrosion daher als sehr wahrscheinlich angesehen, weshalb im Rahmen dieser Arbeit entschieden wurde, den Versuchsaufbau beizubehalten. Da Spaltkorrosion tendenziell die Eigenkorrosion erhöht, liegen die Ergebnisse in der Interpretation auf der sicheren Seite.

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 VORBEMERKUNGEN

Die Durchführung aller Versuche erfolgte (sofern nicht explizit anders erwähnt) bei einer Temperatur $\vartheta \sim 20$ °C. Die elektrochemischen Messdaten wurden daher nicht temperaturkompensiert. Eine Statistik der Klimata der Korrosionsversuche kann **Anhang A, Abb. A.7 - 1** entnommen werden. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Messgeräte und Prüfeinrichtungen ist in **Anhang B, Tabelle B.2 - 1** gegeben. Die verwendeten Messgeräte wurden regelmäßig kalibriert und gegeneinander abgeglichen. Die verwendeten Potentiostaten erfüllen die Genauigkeitsanforderungen an DIN EN ISO 17475 [132].

Alle Proben wurden auf Dreikantleisten aus Kunststoff gelagert, um einen guten Feuchtaustausch mit der Umgebungsluft und eine galvanische Trennung für die elektrochemischen Messungen zu erreichen.

Angegeben ist bei den Messelektroden zur verkürzten Darstellung in Diagrammen in der Regel die Anschlussstelle, die bei den elektrochemischen Messungen am Potentiostaten verwendet wurde. Die Arbeitselektrode (AE) entspricht dabei der Messanode, die Gegenelektrode (GE) der Messkathode. Abweichungen existieren nur in Einzelfällen, die separat gekennzeichnet sind.

Für die Zusatzmesstermine (Polarisationswiderstände R_p , Elektrolytwiderstände R_{el} , freie Korrosionspotentiale E_{oc}) an **Versuchsreihe B** wurde der Kurzschluss zwischen Messanode und Messkathode kurzzeitig aufgehoben. Nach spätestens 24 h waren stabile E_{oc} -Werte an allen Proben erreicht. Daraufhin wurden die Zusatzmessungen durchgeführt und der Kurzschluss binnen maximal 72 h wiederhergestellt.

Die erfassten Elektrolytwiderstände werden mit Ausnahme von **Versuchsreihe A** absolut und nicht spezifisch (geometriebereinigt) angegeben, da die Proben der Korrosionsversuche durch die Trocknung trotz der Ruhephase immer noch einer Veränderung des Geometriefaktors k über die Zeit unterliegen. Mit Ausnahme von **Kapitel 7** werden die Makroelementströme

absolut und nicht als Makroelementstromdichte (mit Flächenbezug) angegeben, da die genaue Mitwirkung der tatsächlichen Oberflächen bei Korrosionsprozessen nicht bekannt ist. Für eine näherungsweise Umrechnung der Werte sind die Maße der Messanoden in **Tabelle 2** in **Kapitel 3.3** für **Versuchsreihe B** angegeben, die auch für die Vergleichsbetrachtungen mit Literaturergebnissen aus **Kapitel 7** verwendet wurden.

4.2 SORPTION

Nach 28 d Nachbehandlung in einer Umhüllung aus Aluminium und Kunststoffolie wurden alle Proben aus **Versuchsreihe A** einer Wärmebehandlung im Trockenschrank bei 60 °C für 14 d unterzogen. 7 d der Wärmebehandlungszeit wurden, durch Entfernen der Umhüllung, für die Trocknung der Adsorptionsproben genutzt. Ziel der Wärmebehandlung war einerseits die künstliche Trocknung, andererseits sollte dadurch der Beton künstlich altern, indem noch nicht hydratisierte Anteile schneller abbinden können. Dadurch sollten betontechnologisch möglichst stationäre Bedingungen für die weiteren Untersuchungen geschaffen werden. Die Maximaltemperatur von $\vartheta = 60$ °C wurde unterhalb der Grenze nach [133] für die Wärmebehandlung von jungen Betonen gewählt. Nach der Wärmebehandlung sind die Proben an Ober- und Unterseite geschliffen worden, um einen besseren Feuchteaustausch zu erreichen. Die Proben für die Desorption wurden daraufhin 24 h im Wasserbad und anschließend bei 98 % Luftfeuchte gelagert, bis deren Masseänderung innerhalb 24 h $< 0,1$ % betrug. Um eine Verschleppung des Chloridgehalts und Auslaugungseffekte zu minimieren, wurden die Proben zur Wasserlagerung in möglichst kleinen Gefäßen gelagert und die Gefäße nach Salzgehalt der Proben unterteilt. Für die Sorptionsuntersuchungen wurden die Proben aus **Versuchsreihe A** in Anlehnung an das Exsikkator-Verfahren aus DIN EN ISO 12571 [134] geprüft. Abweichend zur Norm wurde ein strengeres Kriterium für die Massekonstanz (Masseänderung nach 7 d $< 0,1$ %) und als niedrigste untersuchte relative Luftfeuchtigkeit $\varphi \approx 43$ % gewählt. Alle angegebenen Betonfeuchten u wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 12570 [135] anhand folgender **Gleichung 16** ermittelt:

$$u = \frac{m_f - m_t}{m_t} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 16*}$$

u	massebezogener Feuchtegehalt, hier: Betonfeuchte	[%]
m_f	Masse des Probekörpers vor dem Trocknen	[kg]
m_t	Masse des Probekörpers nach dem Trocknen (105 °C, Massekonstanz)	[kg]

* Indizes und Bezeichnungen wurden auf diese Arbeit spezifiziert

4.3 WÄRMEBEHANDLUNG UND VORSCHÄDIGUNG

Analog zu **Versuchsreihe A** wurde **Versuchsreihe B** ebenfalls für 14 d einer Wärmebehandlung bei $\vartheta = 60\text{ °C}$ und $\varphi = 85\%$, sowie zeitweise $\varphi = 5\%$ unterzogen. Zusätzlich zu den genannten Gründen aus dem vorherigen Abschnitt konnte bei **Versuchsreihe B** dadurch Korrosion bei allen Messanoden ohne eine zusätzlich notwendige elektrochemische Vorschädigung initiiert werden. Während der Wärmebehandlung erfolgte gleichzeitig die beschleunigte Trocknung der Proben auf ihren Desorptionsfeuchtegehalt. Dadurch war es möglich den Korrosionsabtrag außerhalb der jeweils untersuchten Feuchtestufe gering zu halten. Um den Desorptionswassergehalt zu erreichen, wurden eingangs an identischen Proben, abhängig von der Betonrezeptur, Trocknungskurven erstellt. Anhand derer wurden Umlagerungszyklen aus der feuchten Lagerung bei $\varphi = 85\%$ in einen Trocknungsschrank gleicher Temperatur bei $\varphi = 5\%$ ermittelt. Jede Probe hat damit am Ende ihrer Wärmebehandlung und Trocknung einen identischen Wärmeeintrag erfahren. Später bei $\varphi = 95\%$ gelagerte Proben mussten rückbefeuchtet werden. Die ermittelten Trocknungskurven der **Versuchsreihe B** sind in **Abb. 17** dargestellt. Der Wärmebehandlung folgte die in **Kapitel 3.1** beschriebene Ruhephase von rd. 10 Wochen, die der Angleichung der Feuchteverteilung im Probenquerschnitt dienen sollte.

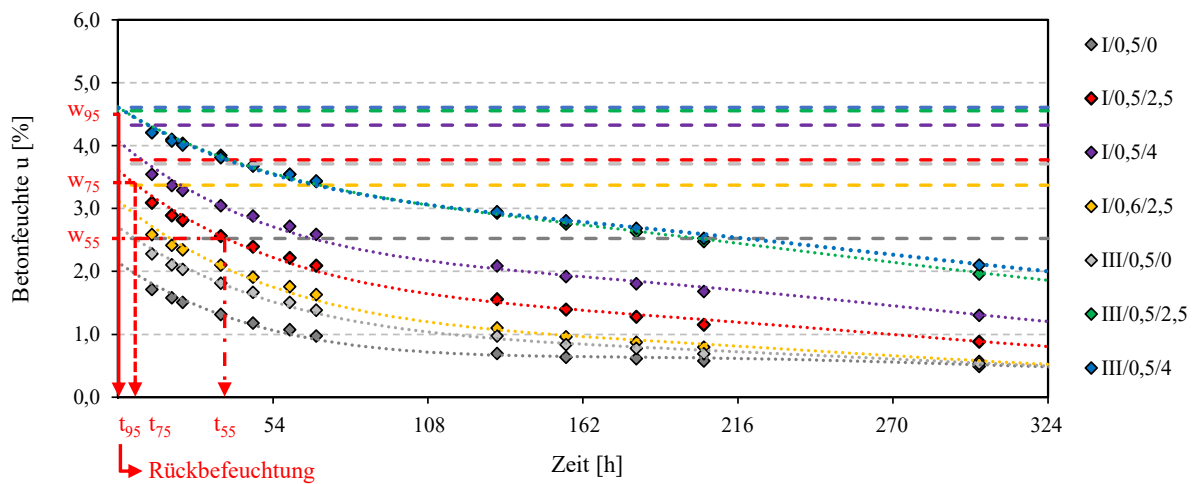


Abb. 17: Trocknung bei Klima 60/5; horizontale Linien: Feuchtegehalte nach 60/85 Lagerung vor Trocknungsbeginn; Trocknungszeit t_{φ} am Beispiel I/0,5/2,5 – **Versuchsreihe B**

4.4 ELEKTROCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN

4.4.1 POTENTIALE

Die Ermittlung der Potentiale erfolgte bei **Versuchsreihe B** durchgehend über Ti/MMO-Bänder als Pseudo-Referenzelektroden (TiRE). Für eine Umrechnung der Potentiale in bezugsstabile Werte wurden die TiRE regelmäßig zu den Terminen der Zusatzmessungen über eine externe CSE abgeglichen, die mit einem feuchten Schwamm angekoppelt wurde. Der Feuchteintrag führte im Rahmen der Untersuchungen zu einem vernachlässigbaren Feuchteintrag je Messtermin, der binnen weniger Stunden wieder abgetrocknet war. Die verwendeten Pseudo-Referenzelektroden erwiesen sich aufgrund der abgewandten Lage zu den Stromfeldern zwischen Anode und Kathode und der relativ großen Oberfläche, auch ohne zusätzliche Isolierung, als hinreichend wenig polarisierbar. Bei der Ermittlung der Strom-Potentialkurven betrug die maximal festgestellte Abweichung zu einer externen Referenzelektrode rd. 10 mV.

4.4.2 MAKROELEMENTSTRÖME

Für die Ermittlung des Eigenkorrosionsanteils während des dauerhaften Kurzschlusses zwischen Messanode und Messkathode war es essentiell, die Makroelementströme I_{makro} (nachfolgend auch als Elementströme bezeichnet) möglichst exakt erfassen zu können.

Die Messung von I_{makro} erfolgte an den Proben als potentiostatischer Halteversuch in Zweielektroden-Anordnung, der einer Zero-Resistance-Ammeter-Anordnung (ZRA) entspricht. Dabei wird die Messkathode mit dem Gegen- und Referenzelektrodenanschluss verbunden. Die Messanode wird mit dem Arbeitselektrodenanschluss verbunden. Der Potentiostat regelt die Potentialdifferenz zwischen Arbeits- und Gegenelektrode „zu Null“ und zeichnet den Stromverlauf auf [136]. Der gemessene Strom entspricht dem nahezu widerstandsfrei gemessenen Makroelementstrom I_{makro} zwischen Messanode und Messkathode.

Da eine dauerhafte automatisierte Messung bei der großen Probenanzahl wirtschaftlich nicht darstellbar gewesen wäre, wurde eine spezielle Steckeranordnung gebaut, die es ermöglichte, alle Proben möglichst effizient manuell hintereinander zu messen. Die Ankontaktierung erfolgte über ein Messarray mit steckbaren Lüsterklemmen. Die Proben lagen nach Ende der

jeweiligen Vorbehandlung im dauerhaften Kurzschluss zwischen Messanode und Messkathode, der in den Diagrammen als Zeitpunkt „ZRA-Messbeginn/-Start“ gekennzeichnet ist. Zum Zeitpunkt der ZRA-Messung konnte über einen Kippschalter für jede Probe der Kurzschluss kurzzeitig aufgehoben und anschließend wieder hergestellt werden, vgl. **Abb. 18**.

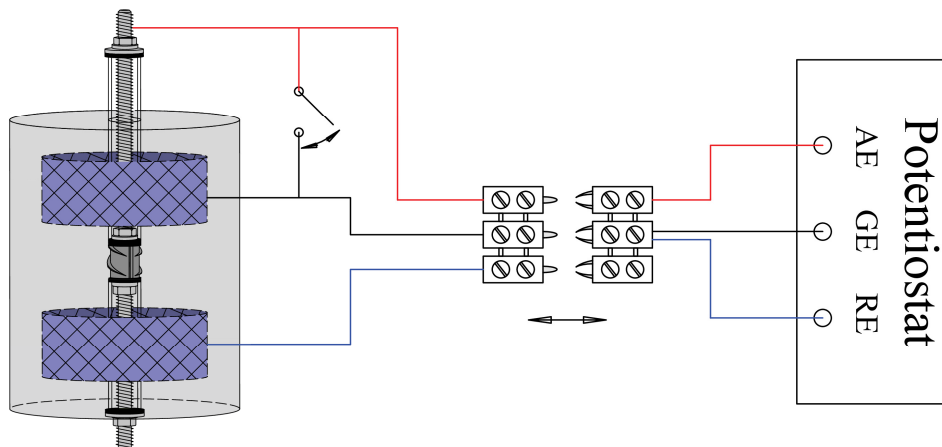


Abb. 18: Skizze der ZRA-Anordnung mit Kippschalter – **Versuchsreihe B**

Der Potentiostat wurde darauf eingestellt, jede Messstelle seriell für zehn Sekunden anzusteuern und die Ergebnisse messstellenspezifisch abzuspeichern. Innerhalb des Zeitfensters von zehn Sekunden wurde manuell auf die nächste Messstelle versetzt und der Kippschalter betätigt. Nach einer stromstärkeabhängigen, kurzen Regelungsphase des Potentiostaten erhielt man als Ergebnis den dauerhaft fließenden Elementstrom I_{ZRA} zwischen Messanode und Messkathode. Die Abweichungen der Elementströme jeder Messstelle wurden über das Ende des Messintervalls zueinander verglichen. Sobald die Abweichung zum Vorwert weniger als 0,1 % betrug, wurde der Median aus drei aufeinanderfolgenden Werten als I_{makro} angesetzt. Dieses Kriterium ist in **Abb. 19** dargestellt und wurde in der Regel bereits rd. 2 Sekunden nach Betätigen des Kippschalters erfüllt.

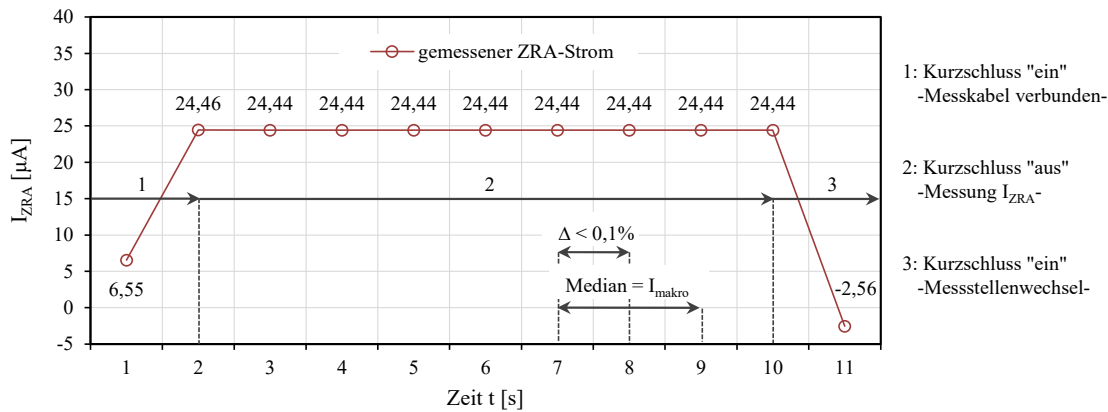


Abb. 19: Ermittlung des angesetzten Elementstroms während eines Messintervalls (die Messsoftware erfasst eine zusätzliche Sekunde zum eingestellten Wert)

Beim Aufbau der kompletten Verkabelung wurde besonderes Augenmerk auf eine widerstandsarme Herstellung aller Verbindungsstellen und Kontakte gelegt. Der elektrische Gesamtwiderstand des Systems (vom Messgerät bis zur Messanode, bzw. bis zur Messkathode) wurde im Vorfeld an identisch hergestellten Referenzaufbauten mit $< 0,5 \Omega$ bestimmt. Dieser Widerstand wurde im weiteren Messverlauf als vernachlässigbar klein, verglichen zum gesamten Korrosionssystem, betrachtet. Vergleichsmessungen an der Steckerleiste und direkt am Probekörper ergaben im Messbereich $> 100 \text{ nA}$ Abweichungen der ZRA-Messwerte $< 1 \%$. Im Bereich von $10 - 100 \text{ nA}$ ergab sich eine Abweichung $< 5 \%$. Die Messwertabweichungen durch die Steckerleisten wurden bei der Auswertung vernachlässigt.

Eine Messung aller Proben aus **Versuchsreihe B** erfolgte zweimal wöchentlich. Um ein versehentliches Kippen der Schalter zwischen den Messterminen zu verhindern, wurden die Schalter mit einer Kippsicherung versehen, die nur zum Zeitpunkt der Messung entfernt wurde. Ein versehentliches Kippen des Schalters zu einem nicht definierten Zeitpunkt hätte sonst einen unerfassten Messfehler in den errechneten Abtragsraten verursacht.

Die Messungen erfolgten an **Versuchsreihe B** nach 8 Monaten im Kurzschluss in einem reduzierten wöchentlichen Intervall, da die Elementströme hier konstanter im Verlauf als zu Beginn der Untersuchungen waren. Dies wurde über eine Vergleichsrechnung der elektrochemisch rückgeschlossenen Masseverluste aller aktiv korrodierenden Proben validiert. Im Zeitraum von 4 bis 8 Monaten lag zwischen einmal wöchentlichen und zweimal wöchentlichen

Messungen die Abweichung bei über 50 % der Werte $\ll 1$ %. Der maximal zu erwartende Fehler betrug 20 % bei sehr kleinen Strömen < 100 nA, was teilweise bedingt durch Schwankungen in der Messung selbst verursacht wurde.

Die Abweichung zwischen den manuellen Messungen und einer höherfrequenten Messung mit einem 2Ω Shunt bei einem 30 min Messintervall lag bei Messungen an Abgleichsproben über den kompletten ZRA-Zeitraum bei den Klimata $\varphi = 95\% < 3$ % und $\varphi = 75$ % bei rd. 6 %. Letztere Abweichung ist dabei primär aufgrund der kleineren Ströme und den damit höheren Abweichungen der Messung mit Shunt zurückzuführen. Proben aus dem Klima $\varphi = 55$ % lagen nach wenigen Wochen überwiegend unterhalb der Auflösungsgrenze der Shuntmessung und waren deshalb nicht vergleichbar.

4.4.3 IR-KORREKTUR, IMPEDANZ UND PHASENWINKEL

Durch Polarisation der Elektroden bei den elektrochemischen Versuchen ergibt sich ein sogenannter IR-Drop. Der IR-Drop ist ein ohmscher Spannungsabfall, der sich zwischen Arbeits- und Referenzelektrode aufgrund des Elektrolytwiderstands einstellt, sobald ein Stromfluss im Elektrolyten stattfindet. Dadurch weicht das an der Referenzelektrode gemessene Potential von dem tatsächlich an der Arbeitselektrode vorhandenen Potential ab [136]. Dieser IR-Anteil wird bei Messmethoden mit Gleichspannung (z.B. Polarisationswiderstand, Stromdichte-Potentialkurven) nicht automatisch miterfasst, wie in **Abb. 20** ersichtlich ist.

Der IR-Anteil wurde bei den Versuchen stets, wie nachfolgend beschrieben, separat bestimmt und der Kurvenverlauf im Nachgang um dessen Anteil korrigiert. Der IR-Drop wurde als Widerstand zwischen Referenzelektrode und Arbeitselektrode in den Versuchen mit Wechselspannung durch Impedanzmessung in Drei-Elektroden-Anordnung ermittelt. Das Randles-Element aus **Abb. 20** beschreibt dabei die Anordnung zwischen Referenzelektrode und Arbeitselektrode in einem einfachen elektrochemischen System in Lösung. Bei Gleichstrom verhält sich der kapazitive Anteil C_{dl} aus **Abb. 20** wie ein offener Schaltkreis, und R_p wird bei den Messungen gemeinsam mit R_{IR} erfasst. Mit steigender Frequenz im Wechselstromkreis wirkt C_{dl} zunehmend wie ein Kurzschluss, womit maßgeblich R_{IR} in obigem Ersatzschaltbild gemessen werden kann.

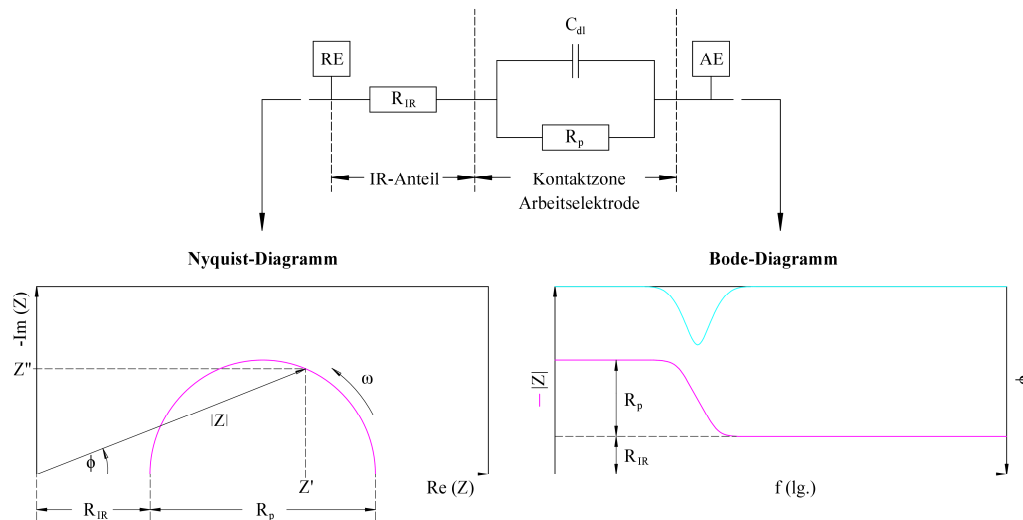


Abb. 20: Idealierte Zeigerdarstellung mit Ersatzschaltbild eines Randles-Elements im Nyquist- und zugehörigen Bode-Diagramm mit: Betrag der Impedanz $|Z|$, Phasenwinkel ϕ , Kreisfrequenz ω , Frequenz f , Referenzelektrode (RE), Polarisationswiderstand R_p , IR-Widerstand R_{IR} sowie Doppelschichtkapazität C_{dl} in Anlehnung an [137–140]; Ausschnitt zwischen RE und AE einer Drei-Elektroden-Anordnung

Aus dem Phasenwinkel kann die gemessene Impedanz in den Realanteil des Widerstands überführt werden. Der Phasenwinkel stellt den Versatz zwischen Strom- und Spannungsverlauf bei Wechselstrommessungen dar. Ein idealer Kondensator besitzt einen frequenzunabhängigen Phasenwinkel von -90° und einen frequenzabhängigen Widerstand, der mit zunehmender Frequenz des Wechselstroms sinkt. Bei einem ohmschen Widerstand ergibt sich ein frequenzunabhängiger Widerstandswert. Spannung und Strom sind hierbei ebenfalls frequenzunabhängig und in Phase, wodurch der Phasenwinkel 0° beträgt. Durch die Kombination aus Kapazität und Resistivität, analog des vereinfachten Randles-Elements nach **Abb. 20**, ergibt sich aus den Kapazitäten und Widerständen eine Frequenzabhängigkeit des Phasenwinkels, wobei dieser dabei immer negativ ist. Die Spannung eilt dem Strom in diesem Fall nach [141].

Bei den untersuchten Proben erwiesen sich anhand der Phasenwinkel Bereiche zwischen rd. 100 Hz bis 10 kHz als geeignet, da hier der Phasenwinkel im Betrag am kleinsten ist ($|\phi| < 5^\circ$) und die gemessene Impedanz nahezu dem kapazitiv unbeeinflussten Realanteil des IR-Widerstands zwischen Referenzelektrode und Arbeitselektrode entspricht. Diese Werte decken sich mit [115, 129]. Steigende Phasenwinkel bei höheren Frequenzen ergeben sich vermutlich durch Polarisationseffekte aufgrund der Interaktion Porenlösung und Porenstruktur

sowie bei Frequenzen $> 10^5$ Hz durch die Permittivität [139]. Für die Bestimmung des Widerstands zur IR-Korrektur wurde an allen Proben eine Frequenz von 1 kHz bei einer Spannungsamplitude von ± 10 mV um das jeweilige Bezugspotential gewählt, vgl. **Abb. 21**.

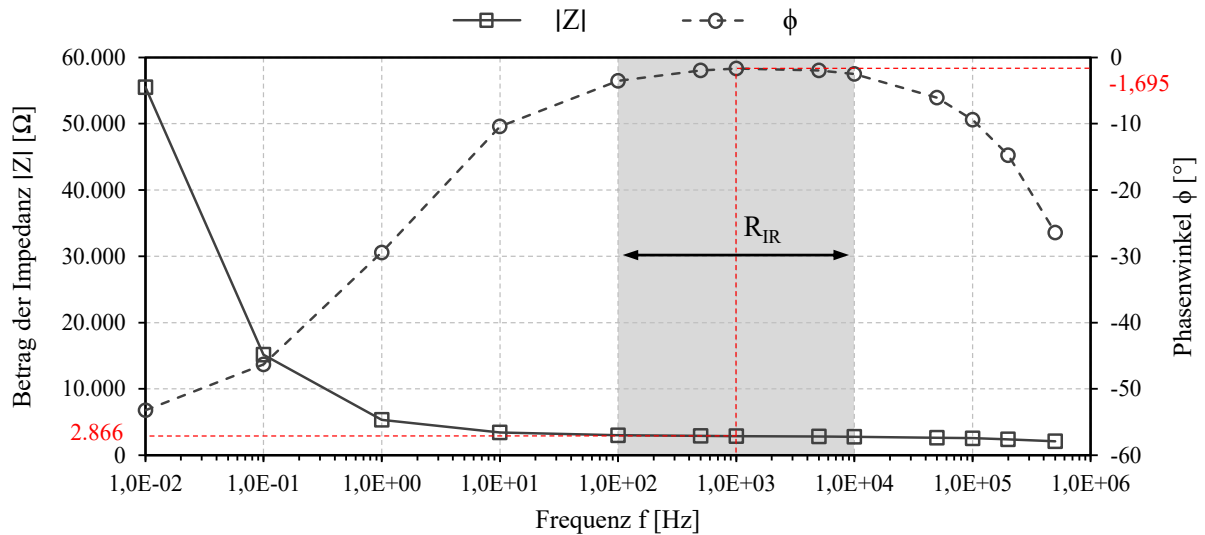


Abb. 21: IR-Drop-Ermittlung bei 1 kHz am Beispiel eines elektrochemischen Impedanzspektrums einer chloridfreien Probe I/0,5/0 im Bode-Diagramm– **Versuchsreihe B**

4.4.4 ELEKTROLYTWERSTÄNDE

Die Elektrolytwiderstände und Phasenwinkel wurden in Anlehnung an *Polder et al.* [115] bei einer Frequenz von 1 kHz zwischen den Titanbändern bei **Versuchsreihe A** in Zwei-Elektroden-Anordnung nach Erreichen des Kriteriums zur Massekonstanz aus **Kapitel 4.2** ermittelt.

Für die Überführung des Widerstands in einen geometriebereinigten spezifischen Widerstand ergibt sich:

$$\rho = k \cdot R_{el} \tag{Gleichung 17}$$

ρ	spezifischer elektrolytischer Widerstand	$[\Omega\text{m}]$
k	Geometriefaktor	$[\text{m}]$
R_{el}	elektrolytischer Widerstand	$[\Omega]$

Bei Messung in Zwei-Elektroden-Anordnung wie in **Abb. 22** für **Versuchsreihe A** dargestellt, ergibt sich nach [115, 139]:

$$k = \frac{A_w}{l} \qquad \text{Gleichung 18}$$

k	Geometriefaktor	[m]
A_w	wirksame Querschnittsfläche	[m ²]
l	Elektrodenabstand	[m]

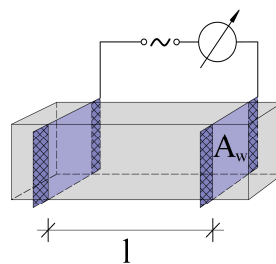


Abb. 22: Elektrolytwiderstandsmessung in Zwei-Elektroden-Anordnung – **Versuchsreihe A**

In **Abb. 23** ist das vereinfachte Ersatzschaltbild für die vorhandene Messanordnung nach **Abb. 22** mit angegeben. Durch die dargestellte Wechselstrommessung wirkt der kapazitive Anteil analog zu den Erläuterungen in **Kapitel 4.4.3** wie ein Kurzschluss, und R_{el} wird maßgeblich erfasst.

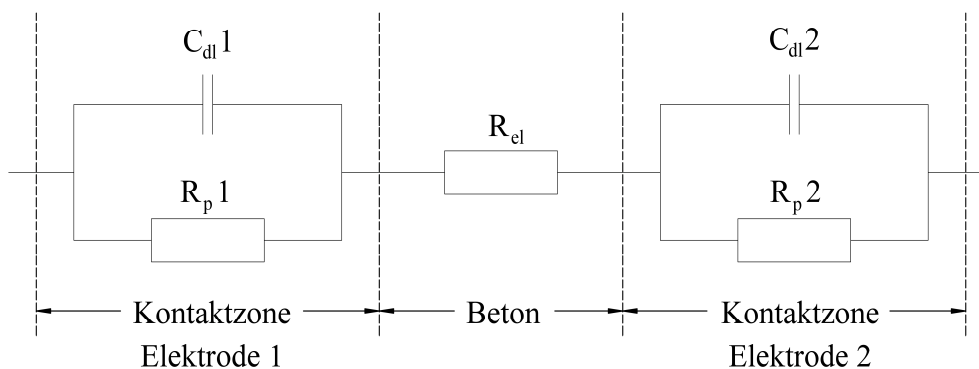


Abb. 23: Vereinfachtes Ersatzschaltbild in Anlehnung an [139, 140, 142, 143]; R_p = Polarisationswiderstand der Elektrode; R_{el} = Elektrolytwiderstand; C_{dl} = Kapazität der Doppelschicht – **Versuchsreihe A**

Bei der Elektrolytwiderstandsmessung wurden die Phasenwinkel mit erfasst, um nachweisen zu können, dass es keinen starken kapazitiven Einfluss auf die Messungen, insbesondere bei zunehmender Trockenheit, gab.

Bei **Versuchsreihe B** wurden bei den Zusatzmessterminen ebenfalls die Elektrolytwiderstände zwischen Messanoden und Messkathoden sowie der Pseudo-Referenzelektroden ermittelt.

4.4.5 POLARISATIONSWIDERSTÄNDE

Der Polarisationswiderstand ergibt sich aus der Steigung der Strom-Potentialkurve und wird meist am freien Korrosionspotential bestimmt [16]. Für die Berechnung von Korrosionsraten eignet sich der Polarisationswiderstand bei Makroelementkorrosion nicht [136, 144], da dort die Mischelektrodentheorie von *Wagner und Traud* [145] keine Gültigkeit besitzt. Die Ermittlung des Polarisationswiderstands diente bei den Versuchen daher zur ergänzenden Unterscheidung von aktiven und passiven Proben vor und während des Zeitraums der dauerhaften Elementstrommessung sowie an den nicht kurzgeschlossenen Zusatzproben.

Für die Bestimmung des Polarisationswiderstands hat die Methode der Messung einen starken Einfluss auf die Ergebnisse. Für einen Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Polarisationswiderstände wurden diese im vorliegenden Fall an allen Proben mit einer schnellen Vorschubgeschwindigkeit von 0,10 mV/s im Bereich von -10 mV bis + 10 mV vs. E_{OC} bestimmt, die zwischen [50] und [130] liegt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde aufgrund des Probenumfangs als Kompromiss aus Genauigkeit und Messzeit gewählt.

Für die Versuche der Steuerungsparameter aus **Kapitel 5.4** wurde der Polarisationswiderstand als potentiostatischer Halteversuch ermittelt, da hier möglichst stationäre Zustände für die Bewertung maßgebend sind. Der potentiostatische Halteversuch (Pstat) wurde bei den Potentialstufen ± 10 mV, ± 5 mV und ± 0 mV um E_{OC} , ausgehend von kathodischer Richtung, bestimmt. Dabei wurde in jeder Stufe der Stromwert nach 180 s angesetzt. Der Wert liegt in einem Bereich, in dem nach [82, 129, 146] ebenfalls annähernd stationäre Bedingungen erreicht

wurden. **Abb. 24** zeigt die Ermittlung des Polarisationswiderstands sowohl mit potentiodynamischem Vorschub, als auch über potentiostatische Haltepunkte.

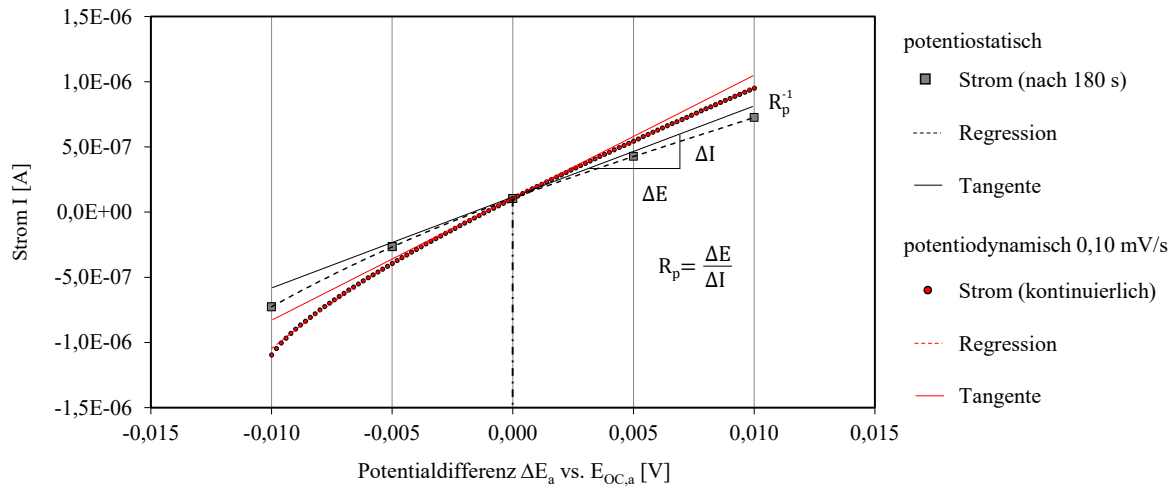


Abb. 24: R_p – Bestimmung potentiostatisch/potentiodynamisch mit Abweichung der Tangentensteigung exemplarisch an aktiver Probe aus Serie III/0,5/2,5 – **Versuchsreihe B**

Vergleichsmessungen zwischen der durchgeführten potentiodynamischen und potentiostatischen Messmethode an 33 Proben der **Versuchsreihe B** ergaben als Median rd. 2,5-fach höhere Polarisationswiderstände bei aktiven Proben durch die potentiostatische Messung. Bei passiven Proben lag diese Abweichung sogar bei einem Faktor als Median von rd. 9. Die schnelleren Vorschubgeschwindigkeiten überschätzen demnach die Korrosionsaktivität. Ein Vergleich der zeitlichen Entwicklung aktiver und passiver Zustände zwischen den Kurzschlussmessungen ist mit der schnellen Vorschubgeschwindigkeit jedoch möglich, da sich passive Proben durch einen deutlichen Anstieg der Polarisationswiderstände bemerkbar machen.

4.4.6 STROM-POTENTIALKURVEN

Über Stromdichte-Potentialkurven wird die Abhängigkeit zwischen einem Elektrodenpotential und der Stromdichte dargestellt [16]. Typische Versuchsanordnungen und Beschreibungen sind in [147] und [132] für Messungen in Lösungen dargestellt. Durch den Kurvenverlauf über einen weiten Potentialbereich um E_{oc} lassen sich Aussagen zur Korrosionskinetik ableiten. In diesem Fall dienen die Stromdichte-Potentialkurven zum Vergleich des Verhaltens der Messanoden, abhängig von Lagerungsfeuchte und untersuchter Betonrezeptur. Im vorliegenden

Fall wird die Bezeichnung Strom-Potentialkurven (SPK) verwendet, da die Werte ohne Flächenverrechnung angegeben sind. Für die Messung wurde die Arbeitselektrode AE potentiostatisch in 25 mV-Schritten ausgelenkt und die Potentialstufe für jeweils 30 min gehalten. Dieser Zeitraum war (anhand von Vorversuchen nachgewiesen) ausreichend lange, damit sich an den Proben ein quasi-stationärer Strom bei den hier untersuchten Auslenkungen einstellen konnte. Der potentiostatische Vorschub wurde gewählt, damit eine IR-Korrektur nach jedem Haltepunkt ermittelt werden konnte und sich, abweichend zu galvanostatischen Messungen, keine Mehrdeutigkeit der Strom-Potentialkurve ergeben kann [136]. Die SPK wurden ausgehend von E_{oc} bis zu einer Polarisation von 1200 mV in anodischer Richtung vor IR-Korrektur bestimmt. Als Abbruchkriterium wurde das Erreichen eines Stroms von 200 μA gewählt, um den relevanten Bereich der ermittelten Kurzschlussströme aller Serien bei den ZRA-Messungen abzudecken.

4.5 GRAVIMETRIE UND BEIZEN

Zur Bestimmung der Eigenkorrosionsanteile wurden die Stahlanoden vor und nach den Korrosionsversuchen auf eine Genauigkeit von 10 μg gewogen. Die Anfangswägung erfolgte nach der Reinigung der Proben in Aceton, destilliertem Wasser und anschließend Ethanol. Dabei erhielt jede Probe von **Versuchsreihe B** eine fortlaufende Nummerierung über beschriftete Schrumpfschläuche auf den Gewindestählen. Unmittelbar darauffolgend sind die Proben in der Schalung verbaut worden.

Nach den Korrosionsversuchen fand bei jeder Probe eine Endreinigung und erneute Wägung statt. Die Proben wurden zur Reinigung in einer Lösung aus Salzsäure und Hexamethylentetramin („C.3.1“ nach DIN EN ISO 8407 [148]) im Ultraschallbad gebeizt, bis die Korrosionsrückstände entfernt waren. Die Blindproben, die bei jeder Versuchsreihe unmittelbar vor dem Beginn der Kurzschlussmessung entnommen wurden, ergaben dabei jeweils Referenzbeizzeiten von 20 min. Mit stärkerer Korrosion ergaben sich teilweise längere Beizzeiten, die über eine lineare Regression aus mehreren Zwischenwägungen auf die Referenzbeizzeit rückgerechnet wurden. Die Verrechnung kann **Gleichung 19** bis **Gleichung 23** entnommen werden.

$$MV_{korr} = \frac{\Delta m_{korr}}{m_e} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 19}$$

$$MV_{blind} = \frac{\Delta m_{blind}}{m_e} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 20}$$

$$MV_{ges} = \frac{\Delta m_{ges}}{m_e} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 21}$$

$$\Delta m_{korr} = m_e - m_{nb} + m_{bk20} + \Delta m_{blind} \quad \text{Gleichung 22}$$

$$\Delta m_{ges} = m_e - m_{nb} + m_{bk} \quad \text{Gleichung 23}$$

MV_{korr}	prozentualer, korrosionsbedingter Masseverlust (im Kurzschlusszeitraum)	[%]
MV_{blind}	prozentualer Masseverlust der Blindproben	[%]
MV_{ges}	prozentualer, gesamter (korrosionsbedingter) Masseverlust im Untersuchungszeitraum	[%]
Δm_{korr}	korrosionsbedingter, gravimetrisch ermittelter Masseverlust (im Kurzschlusszeitraum)	[kg]
Δm_{blind}	Masseverlust der Blindproben nach 121 d und 20 min Beizezeit	[kg]
Δm_{ges}	gesamter (korrosionsbedingter) Masseverlust im Untersuchungszeitraum	[kg]
m_e	Masse vor Einbau in die Schalung	[kg]
m_{nb}	Masse nach Ausbau und Beizen	[kg]
m_{bk20}	Masse Beizezeitkorrektur auf 20 min Referenzbeizezeit	[kg]
m_{bk}	Masse Beizezeitkorrektur des gesamten Beizzyklus	[kg]

Die berücksichtigten Masseverluste der Blindproben nach 121 d Probenalter vor Beginn des Kurzschlusses zwischen Messanode und Messkathode sind in **Tabelle 3** zusammengestellt.

Tabelle 3: Übersicht der ermittelten prozentualen Massenverluste der Blindproben nach 121 d

φ [%]	MV_{blind} [%]		
	95	75	55
I/0,5/2,5	2,678	2,665	2,565
I/0,5/4	1,988	2,250	1,228
I/0,6/2,5	2,746	2,503	2,528
III/0,5/2,5	1,293	0,752	0,590
III/0,5/4	1,876	0,699	0,555

Der Eigenkorrosionsanteil EK wurde nach **Gleichung 24** berechnet und kann nach **Gleichung 25** analog zu [81] in einen Eigenkorrosionsfaktor f_{eigen} überführt werden, der mit I_{makro} multipliziert den wahren Korrosionsstrom ergibt.

$$EK = \frac{\Delta m_{\text{korr}} - \Delta m_{\text{makro}}}{\Delta m_{\text{korr}}} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 24}$$

$$I_{\text{korr}} = I_{\text{makro}} + I_{\text{eigen}} = I_{\text{makro}} \cdot f_{\text{eigen}} = \frac{I_{\text{makro}}}{(100 - EK)} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 25}$$

EK	Eigenkorrosionsanteil	[%]
Δm_{korr}	korrosionsbedingter, gravimetrisch ermittelter Masseverlust (im Kurzschlusszeitraum)	[kg]
Δm_{makro}	elektrochemisch ermittelter Masseverlust	[kg]
I_{korr}	Korrosionsstrom	[A]
I_{makro}	Makroelementstrom	[A]
I_{eigen}	Eigenkorrosionsstrom	[A]
f_{eigen}	Eigenkorrosionsfaktor	[-]

4.6 MIKROSKOPIE UND TOPOMETRIE

Die geschädigten Oberflächen der ausgebauten Stähle wurden nach den gravimetrischen Untersuchungen mittels Digitalmikroskopie dokumentiert. Anschließend erfolgte die Vermessung der Proben mit einem Laserprofilometer zur Bestimmung des maximalen Querschnittsverlusts an den Mantelflächen. Ein Abgleich der Genauigkeit des Laserprofilometers erfolgte mittels Digitalmikroskopie an Referenzproben.

Die Stahlproben wurden unter dem Profilometer mittels Getriebemotor bei einer definierten Drehzahl angesteuert, woraus sich in der Auswertung eine Abwicklung erzeugen lässt, vgl. **Abb. 25**. Die Welle zur Probenhalterung wurde zweifach kugelgelagert, um eine möglichst präzise Rotation zu ermöglichen. Das Laserprofilometer erreicht eine einstellungsabhängige Auflösung von 13 - 17 μm . Aufgrund der zentrischen Messung über der Probe verbleibt ein Messschatten an den Rändern bei unterhöhlten Lochnarben, der vorliegend aufgrund der überwiegend ausgebildeten Narbengeometrie aber nur eine untergeordnete Rolle auf die Genauigkeit der Ergebnisse spielt.

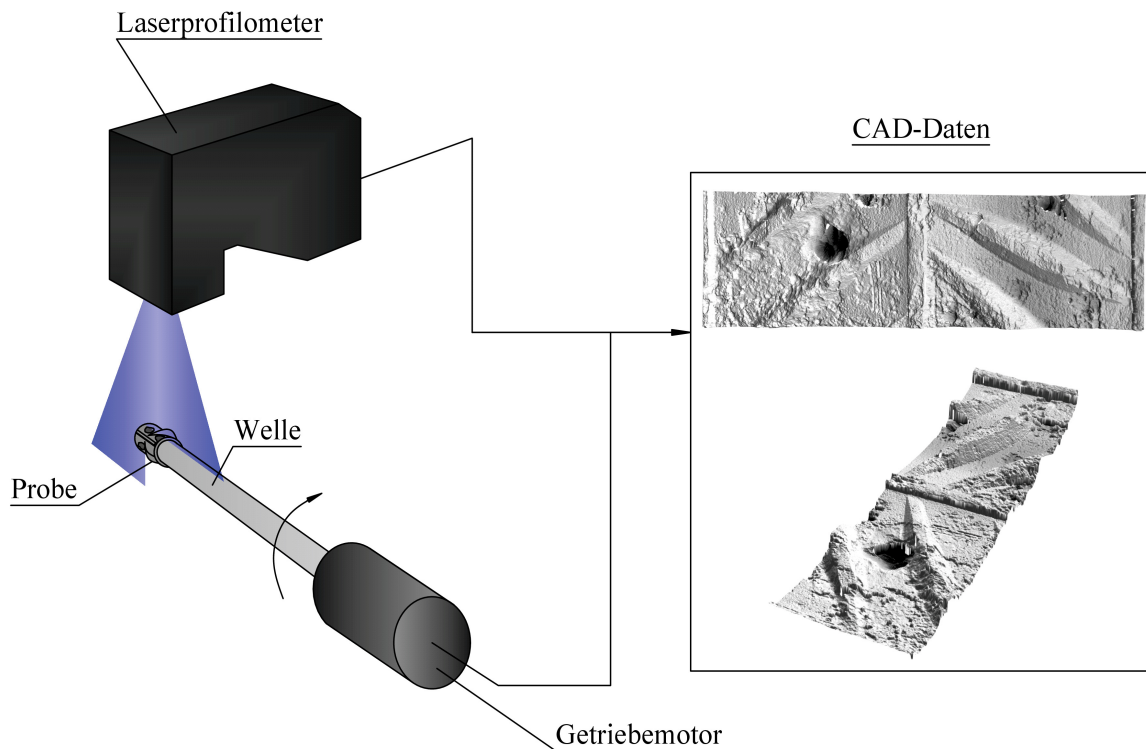


Abb. 25: Skizze der Vermessung der Proben mittel Laserprofilometer – **Versuchsreihe B**

Die gewonnenen 3D-Daten wurden mit der Software „Mountains 8“ hinsichtlich des maximalen Querschnittsverlusts vermessen. Die Ergebnisse wurden an Stichproben über die CAD-Software „Rhinceros 3D“, Version 7, abgeglichen. **Abb. 26** zeigt einen Vergleich zwischen Bildern der Digitalmikroskopie und einer in CAD rückgebogenen Abwicklung des Laserprofilscans.



Abb. 26: Vergleich von gerenderten Aufnahmen mit Laserprofilometer (links) und Digitalmikroskopie (rechts) an einer Probe aus Serie I/0,5/2,5 – **Versuchsreihe B**

Trotz der sehr präzisen Rotation der Stahlwelle ergaben sich Exzentrizitäten bei der Vermessung, die sich in der Abwicklung als Wellenverlauf darstellen. Diese sind einerseits herstellungsbedingt auf Lagetoleranzen der Bohrungen in den Messanoden zurückzuführen, die sich beim Spannen in der Drehbank durch die Rippung nicht vollständig vermeiden lassen, andererseits auf die minimal ellipsoide, rippenlose Kernform des Bewehrungsstahls. Die Wellenform ist in der Software theoretisch glättbar, verfälscht aber dann auch die Narbengeometrien. Für die Auswertung wurde, wie in **Abb. 27** ersichtlich ist, der Bereich mit den größten Schädigungen zuerst tiefenabhängig farbig hinterlegt. An den dabei relevanten Bereichen wurden mehrere Längsschnitte gesetzt, von denen der maßgebende Schnitt herausgesucht wurde. Über ungeschädigte Referenzpunkte auf der Stahloberfläche wurden Verbindungsgeraden gezogen und der Flächenanteil sowie die maximale Narbentiefe bestimmt. Abweichungen der Narbentiefe aufgrund der geraden anstelle von ausgerundeten Verbindungslinien wurden dabei vernachlässigt.

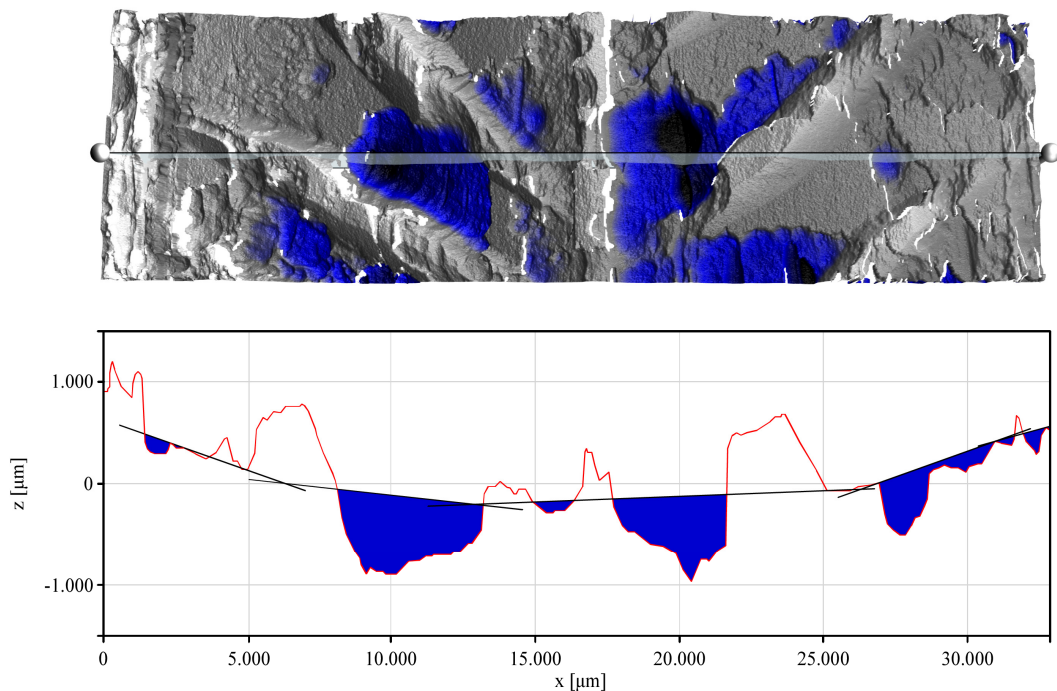


Abb. 27: Bestimmung des maximalen Querschnittsverlusts (Darstellung überhöht) – **Versuchsreihe B**

Da die Möglichkeit der Laserprofilometrie zu Beginn der Untersuchungen noch nicht zur Verfügung stand, existierten keine probenspezifischen, ungeschädigten Abwicklungen der Proben, die eine Überlagerung der Schnitte ermöglichte. Die Auswertung der gerippten Stähle stellt sich

demnach deutlich aufwendiger dar, als die von Glattstählen. Für die Auswertung des maximalen Querschnittsverlusts und der Schädigungstiefe wurde daher die Annahme getroffen, dass ausschließlich der rippenlose Kernquerschnitt des Stahls für die Tragfähigkeit relevant ist. Querschnittsverluste beziehen sich ausschließlich auf den Kernquerschnitt ohne Rippen. Dabei ergab sich durch Vermessung mehrerer willkürlicher Schnittbilder im Mittel eine um 9,5 % reduzierte Querschnittsfläche ohne Rippen, verglichen zum ideellen Querschnitt.

Analog zum Masseverlust zu Beginn der dauerhaften Kurzschlussmessung wurde der Querschnittsverlust, der durch die Vorlagerung der Proben entstand, aus den Gesamtverlusten herausgerechnet, um einen Rückschluss auf die in diesem Zeitraum entstandenen Masseverluste zu erhalten. Der Anteil wurde näherungsweise über eine exponentielle Regression der Mediane aus den Masseverlusten jeder Serie und zu dem zugehörigen Blindprobenwert anteilig nach **Anhang A, Abb. A.6 - 1** rückgerechnet. Die angesetzten Querschnittsverluste der Blindproben sind in **Tabelle 4** dargestellt. Die Berechnungen der Querschnittsverluste sind in **Gleichung 26** und **Gleichung 27** gegeben.

Tabelle 4: Übersicht der rückgerechneten Querschnittsverluste der Blindproben nach 121 d

φ [%]	QV _{blind} [%]		
	95	75	55
I/0,5/2,5	1,151	1,147	1,119
I/0,5/4	1,531	1,574	1,413
I/0,6/2,5	1,744	1,704	1,703
III/0,5/2,5	1,006	0,871	0,835
III/0,5/4	0,971	0,731	0,707

$$QV = \frac{A_v}{A_0} \cdot 100 \tag{Gleichung 26}$$

$$QV_{korr} = QV_{ges} - QV_{blind} \tag{Gleichung 27}$$

QV	prozentualer Querschnittsverlust (allgemein)	[%]
A _v	verlorene Querschnittsfläche (allgemein)	[m ²]
A ₀	Ausgangsquerschnitt der Messanode	[m ²]
QV _{korr}	prozentualer, korrosionsbedingter Querschnittsverlust (im Kurzschlusszeitraum)	[%]
QV _{ges}	prozentualer, gesamter ermittelter Querschnittsverlust	[%]
QV _{blind}	prozentualer Querschnittsverlust der Blindproben nach 121 d	[%]

Für die Berechnung der Pittingfaktoren α_{pit} , die in **Kapitel 2.1.7** erläutert wurden, ist der Gesamtmasseverlust inkl. des Blindprobenwerts, aber mit Korrektur der gesamten Beizzeit zu Grunde gelegt worden, da mit diesen Werten ein besserer Literaturvergleich als mit den blindprobenbereinigten Werten möglich ist. Für den gleichmäßigen Abtrag wird das Volumen des Hohlzylinders mit 10 mm Außendurchmesser (Nenndurchmesser der Bewehrung) aus **Gleichung 28** angesetzt:

$$\alpha_{pit} = \frac{X_{max}}{X_{gleich}} \quad \text{Gleichung 15}$$

$$X_{gleich} = \frac{D_0 - d_{gleich}}{2} = \frac{D_0 - \sqrt{-\frac{V_{ges} \cdot 4}{\pi \cdot h} + D_0^2}}{2} \quad \text{Gleichung 28}$$

$$V_{ges} = \frac{\Delta m_{ges}}{\rho_{St}} \quad \text{Gleichung 29}$$

$$\Delta m_{ges} = m_e - m_{nb} + m_{bk} \quad \text{Gleichung 30}$$

α_{pit}	Pittingfaktor	[-]
X_{max}	maximale Schädigungstiefe	[m]
X_{gleich}	errechnete Schädigungstiefe bei homogenem Korrosionsabtrag	[m]
D_0	ideeller Anfangsdurchmesser Messanode (10 mm)	[m]
d_{gleich}	ideeller Durchmesser Messanode nach gleichmäßiger Korrosion	[m]
V_{ges}	Volumen des gesamten (korrosionsbedingten) Stahlabtrags	[m ³]
h	Höhe des betrachteten Hohlzylinders (10 mm)	[m]
Δm_{ges}	gesamter (korrosionsbedingter) Masseabtrag während Untersuchungszeitraum	[kg]
ρ_{St}	Dichte Stahl (7850 kg/m ³)	[kg/m ³]
m_e	Masse vor Einbau in die Schalung	[kg]
m_{nb}	Masse nach Ausbau und Beizen	[kg]
m_{bk}	Masse Beizzeitkorrektur des gesamten Beizzyklus	[kg]

5 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION

5.1 ALLGEMEINES

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse präsentiert und diskutiert. Diagramme, die nach Versuchsserie getrennt sind, werden durch die Hauptserie I/0,5/2,5 im Hauptteil repräsentiert. Die Diagramme aller Serien sind in den entsprechenden Anhängen zu finden, auf die separat verwiesen wird.

5.2 EINFLUSS DER TROCKNUNG AUF KORROSIONSRELEVANTE BETONPARAMETER

5.2.1 ALLGEMEINES

Eingangs erfolgt die Darstellung der korrosionsrelevanten Betonparameter. Dazu zählen insbesondere die Sorptionsisothermen, sowie die Feuchtegehalts-Widerstandsbeziehungen der untersuchten Betone. Diese wurden vorab an **Versuchsreihe A** ermittelt und ermöglichen zusätzlich zur beschleunigten Trocknung von **Versuchsreihe B** eine bessere Interpretierbarkeit der Korrosionsversuche. Aufgrund der deutlich größeren Probenabmessungen, verglichen zu **Versuchsreihe A**, unterliegt **Versuchsreihe B** zusätzlich bei den Elektrolytwiderständen R_{el} einer größeren Zeitabhängigkeit über den Untersuchungszeitraum. Diese resultiert aus einer anfänglich noch ungleichmäßigen Feuchteverteilung in den Proben nach der Trocknungs- und Ruhephase. Ergebnisse der Sorptionsisothermen und Elektrolytwiderstandsmessungen aus **Versuchsreihe A** wurden bereits in [76] veröffentlicht.

5.2.2 SORPTIONSISOTHERMEN UND PORENVERTEILUNG

Die Sorptionsisothermen aus **Versuchsreihe A** sind als Betonfeuchte-Luftfeuchtebeziehung der CEM I-Betone in **Abb. 28**, die der CEM III/A-Betone in **Abb. 29** bezogen auf die absolute Betonfeuchte dargestellt. In **Anhang A, Abb. A.2 - 1** und **Abb. A.2 - 2** sind die entsprechenden Diagramme bezogen auf die relative Betonfeuchte ersichtlich.

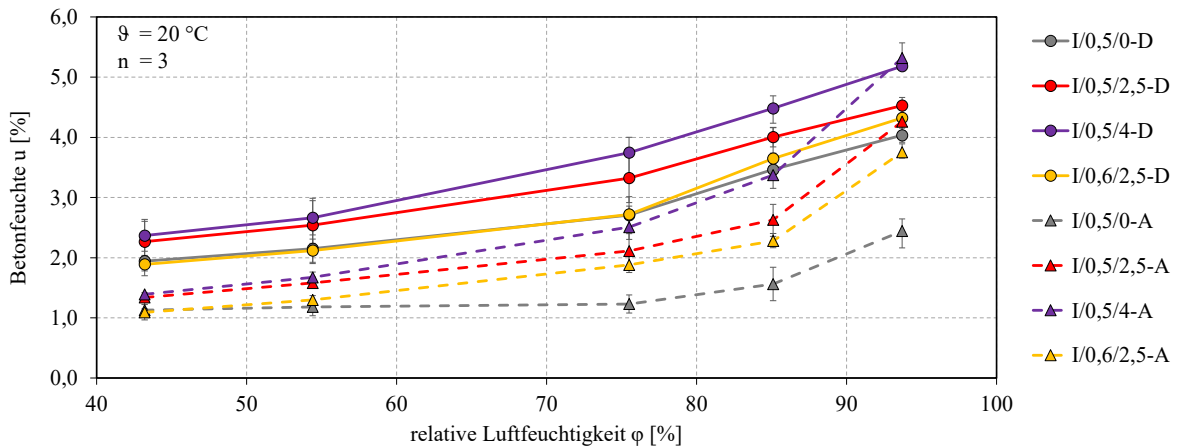


Abb. 28: Sorptionsisothermen CEM I -Betone; absolute Betonfeuchte; Mittel-, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe A** [76]

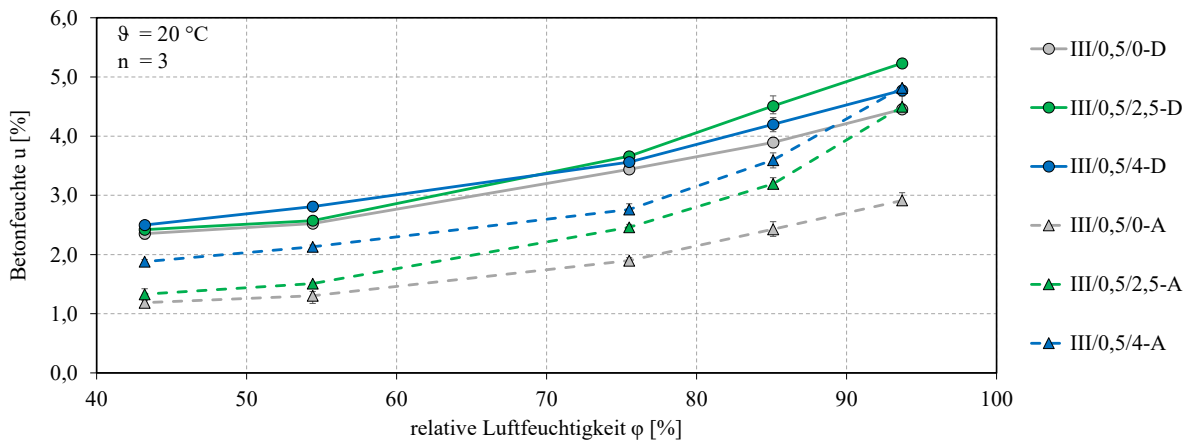


Abb. 29: Sorptionsisothermen CEM III/A-Betone; absolute Betonfeuchte; Mittel-, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe A** [76]

Erwartungsgemäß nimmt durch die höhere Hygroskopizität mit steigendem Cl-Gehalt die Probenfeuchte in jeder Feuchtestufe zu. Lediglich die Serien III/0,5/2,5 und III/0,5/4 weisen hierbei ein abweichendes Verhalten bei Desorption auf. Dies kann durch ein unterschiedliches maximales Porenvolumen begründet werden, da dieses Phänomen bei Bezug auf die relativen Betonfeuchten nicht zu beobachten ist, vgl. **Anhang A, Abb. A.2 - 2**. Der höhere w/z-Wert von Serie I/0,6/2,5 führte im Vergleich zu I/0,5/2,5 zu geringeren Feuchtegehalten der Proben in allen untersuchten Klimastufen, sowohl bei der Desorption als auch bei der Adsorption. Während die Adsorptionsfeuchtegehalte in der Regel deutlich unter den Desorptionsfeuchtegehalten liegen, verschwindet dieser Unterschied zunehmend bei höheren Luftfeuchten und höheren Chloridgehalten der Proben. Generell liegen die CEM III/A-Betone hinsichtlich ihrer Sorptionsisothermen deutlich näher zusammen als die Betone mit CEM I-Zement. Dabei weisen die

CEM III/A-Betone eine höhere Probenfeuchte im Vergleich zu den CEM I-Betonen bei gleicher Lagerungsfeuchte auf, was aufgrund der in der Regel höheren Dichte der CEM III/A-Betone zuerst widersprüchlich erscheint. *Schneider und Meng* [149] beschreiben ein ähnliches Gesamtporenvolumen von hüttensandhaltigem Zementstein und Portlandzementstein bei feinerer Porenstruktur der hüttensandhaltigen Bindemittel, was die vorliegend höhere Probenfeuchte begründet. Als Abgleich wurden Proben aus den Serien I/0,5/0 und III/0,5/0 mittels Quecksilberporosimetrie an der Universität der Bundeswehr München geprüft – dabei wurde die These der ähnlichen Gesamtporenvolumina mit engerer Porenstruktur untermauert.

Für die Korrosionsversuche wurden ausschließlich die Desorptionsisothermen betrachtet, da die Trocknung von einer hohen Ausgangsfeuchte den praxisüblicheren Fall bei Stahlbetonbauteilen darstellt.

Die erreichten Betonfeuchten bei Beginn der Kurzschlussmessungen (ZRA-Start) und die Endwerte beim Ausbau der Proben (ZRA-Ende) von **Versuchsreihe B** sind den Desorptionsisothermen aus **Versuchsreihe A** in **Anhang A, Abb. A.2 - 3 bis Abb. A.2 - 9** gegenübergestellt und in **Abb. 30** für Serie I/0,5/2,5 exemplarisch angegeben. Dort ist erkennbar, dass die Ausgleichsfeuchtegehalte der CEM I-Betone sehr gut erreicht werden konnten und sich auch nur kleine Umverteilungen der Probenfeuchten über den Messzeitraum von 12 Monaten ergaben.

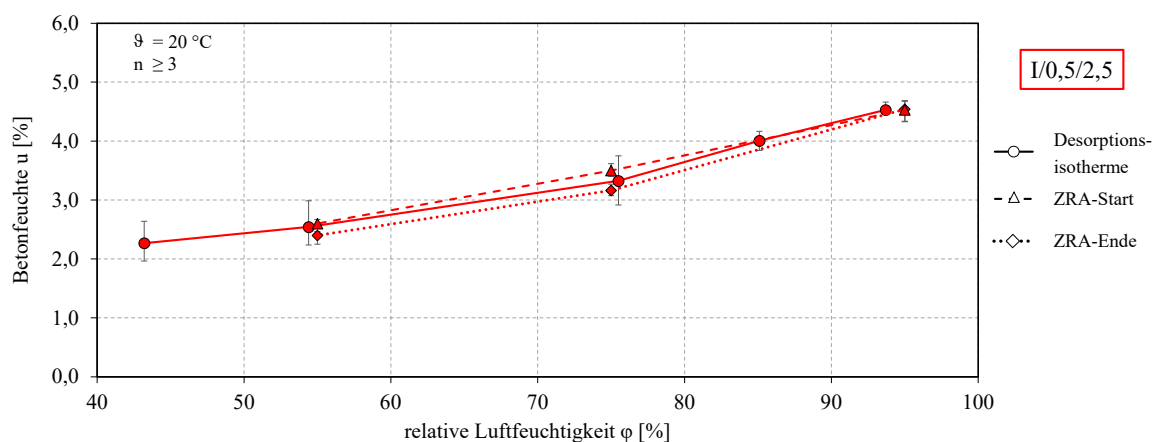


Abb. 30: Betonfeuchte, Serie I/0,5/2,5; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76]; **Versuchsreihe B:** vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

Abweichend zu den CEM I-Serien ergaben sich bei den Betonfeuchten der CEM III/A-Serien aus **Versuchsreihe B** deutlich ausgeprägtere Abweichungen zu den Desorptionsfeuchtegehalten aus **Versuchsreihe A**. Das liegt im Zementwechsel der CEM III/A-Serien begründet, der für eine bessere Anknüpfbarkeit der Ergebnisse an das WIPANO „KoMICS“-Forschungsprojekt vor Erstellung der **Versuchsreihe B** gewählt wurde. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf den endgültig verwendeten Zement. Die Desorptionspunkte für die Trocknung wurden jedoch aufgrund der zu Versuchsbeginn noch fehlenden Werte anhand der Betone mit der alten Zementcharge gewählt (hier nicht dargestellt). Dessen Sorptionsisothermen weichen zu denen des aktuellen Zements, trotz gleicher Zementart, deutlich ab.

5.2.3 ELEKTROLYTWIDERSTÄNDE UND PHASENWINKEL

Bei den Widerstands-Luftfeuchtebeziehungen aus **Abb. 31** und **Abb. 32** sowie den Betonfeuchte-Widerstandsbeziehungen aus **Abb. 33** bestätigt sich tendenziell das Verhalten aus den Sorptionsisothermen: mit abnehmenden relativen Luftfeuchten und damit sinkenden Probenfeuchten steigen die elektrolytischen Widerstände aufgrund des fehlenden Transportmediums für die Ionen als Ladungsträger an. Je geringer der Chloridgehalt der Probe ist, desto stärker tritt dieses Phänomen auf. Bei Desorption sind die spezifischen Elektrolytwiderstände speziell bei trockeneren Umgebungsfeuchten deutlich niedriger als bei gleicher Lagerungsfeuchte und Adsorption. Das liegt hauptsächlich an den niedrigeren Betonfeuchtegehalten bei der Adsorption und relativiert sich bei hohen Luftfeuchten und steigenden Chloridgehalten der Proben.

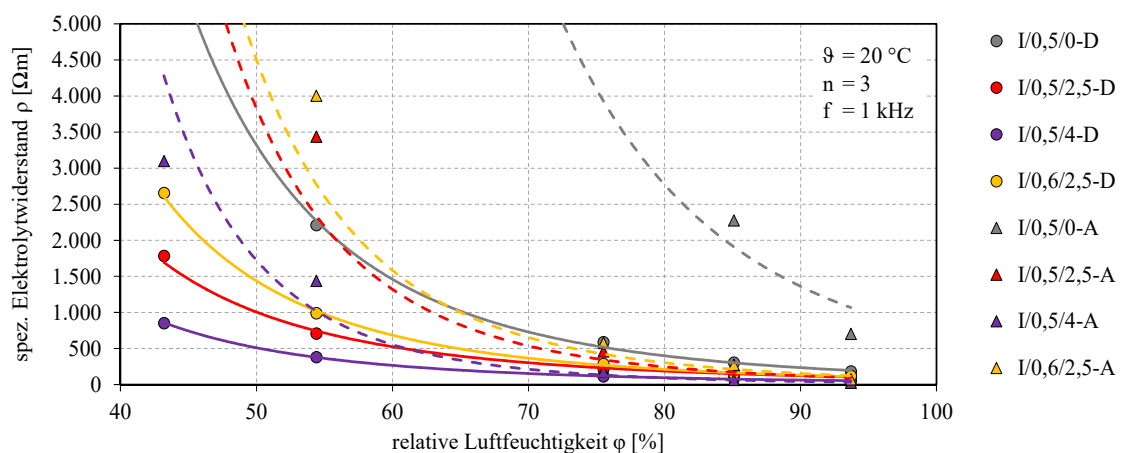


Abb. 31: Widerstands-Luftfeuchtebeziehung der untersuchten CEM I-Betone; Mittelwerte – **Versuchsreihe A** [76]

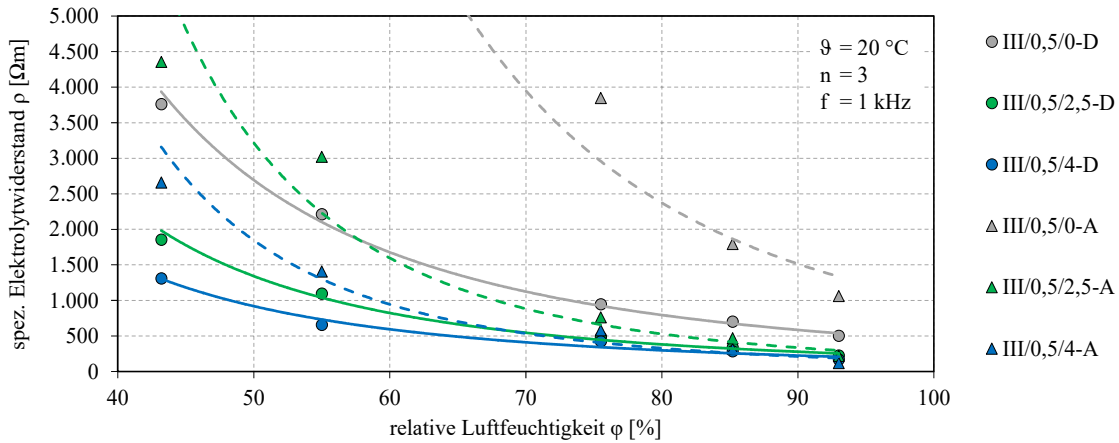


Abb. 32: Widerstands-Luftfeuchtebeziehung der untersuchten CEM III/A-Betone; Mittelwerte – **Versuchsreihe A** [76]

Die CEM III/A-Betone weisen in **Abb. 33** bei Betonfeuchten über rd. 2,0 M.-% deutlich höhere Widerstände als die CEM I-Betone auf, was auf die feinere Porenstruktur und den damit verbundenen längeren Strecken für den Ionentransport zurückzuführen ist. Im Bereich kleiner von rd. 2,0 M.-% zeichnet sich aufgrund des flacheren Kurvenverlaufs der CEM III/A-Proben jedoch eine Überschneidung mit den CEM I-Betonen ab. Die im Vergleich zu den CEM I-Serien geringeren Elektrolytwiderstände der CEM III/A-Serien bei niedrigen Betonfeuchtegehalten sind durch eine bessere Feuchtebenetzung der engmaschigeren Poren bei trockener Lagerung begründbar.

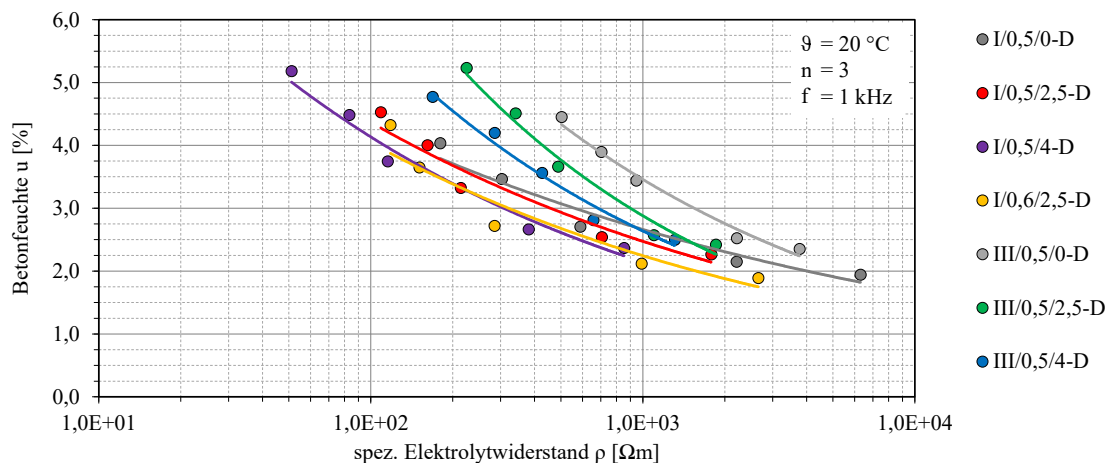


Abb. 33: Betonfeuchte-Widerstandsbeziehung aller untersuchten Betone (Desorption); Mittelwerte – **Versuchsreihe A** [76]

Die spezifischen Elektrolytwiderstände ρ aus **Versuchsreihe A** für die untersuchten Feuchtestufen der **Versuchsreihe B** sind nachfolgend zur besseren Übersichtlichkeit in **Tabelle 5** dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht der spez. Elektrolytwiderstände ρ aus den Regressionskurven von **Versuchsreihe A** für die relativen Luftfeuchten ϕ der Korrosionsversuche bei Desorption

ϕ [%]	ρ [Ωm]		
	95	75	55
I/0,5/0	184	534	2.161
I/0,5/2,5	102	237	716
I/0,5/4	52	120	364
I/0,6/2,5	106	277	976
III/0,5/0	509	940	2.103
III/0,5/2,5	241	454	1.040
III/0,5/4	198	349	732

Die gemessenen Phasenwinkel ϕ bei der Bestimmung der spezifischen Elektrolytwiderstände sind für die CEM I-Betone in **Abb. 34** und für die CEM III/A-Betone in **Abb. 35** in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit ϕ bei der Lagerung gegeben.

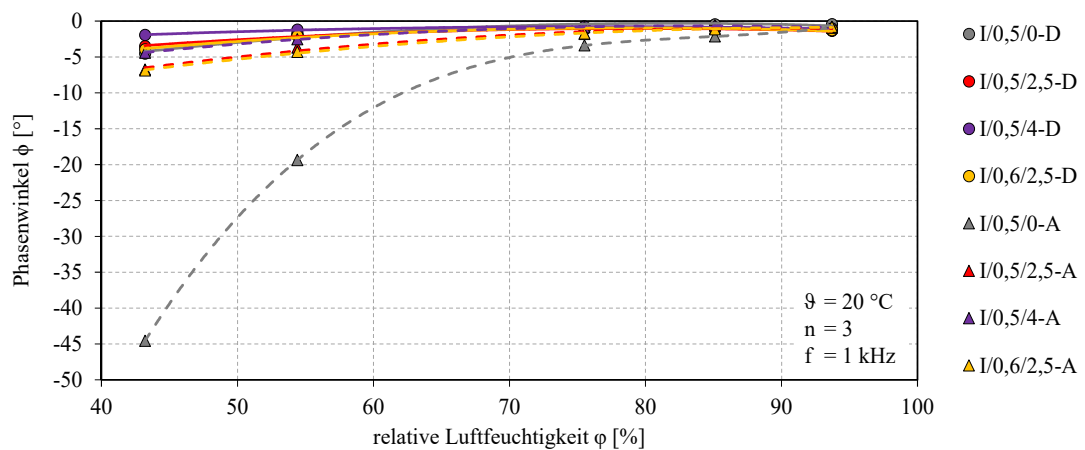


Abb. 34: Phasenwinkel-Luftfeuchtebeziehung der untersuchten CEM I–Betone; Mittelwerte – **Versuchsreihe A** [76]

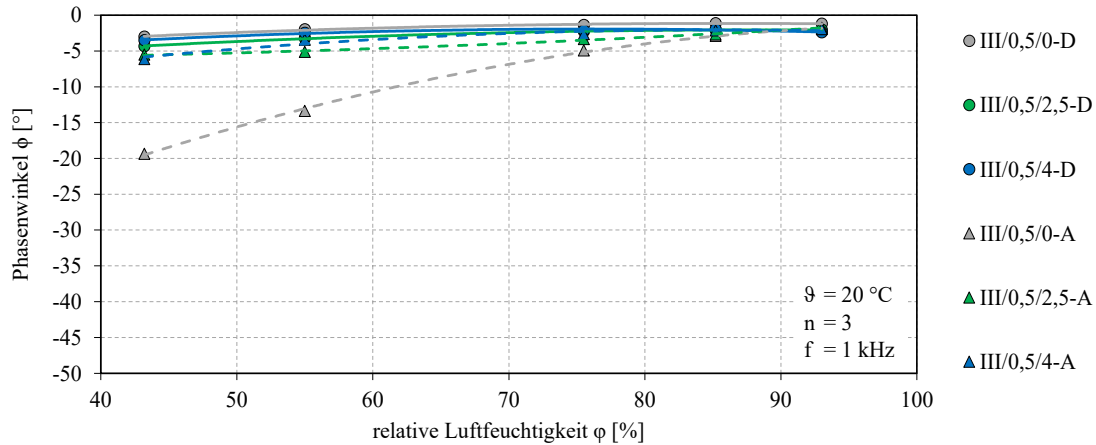


Abb. 35: Phasenwinkel-Luftfeuchtebeziehung der untersuchten CEM III/A–Betone; Mittelwerte – **Versuchsreihe A** [76]

Mit niedrigeren relativen Luftfeuchten werden die Phasenwinkel zunehmend negativer, was für einen steigenden kapazitiven Anteil bei der Messung spricht. Der Beton zwischen den Messelektroden verhält sich zunehmend mehr wie ein Dielektrikum [150], was sich auch mit den steigenden Widerständen deckt. Allerdings weisen alle Betonrezepturen bis zur niedrigsten gemessenen Luftfeuchte von $\phi = 43$ % einen Phasenwinkel bei Desorption von $\phi > -5^\circ$ auf. Die gemessenen Impedanzen bei einer Frequenz $f = 1$ kHz, die bei den Korrosionsversuchen auch regelmäßig miterfasst wurden, entsprechen damit näherungsweise den Realanteilen der elektrolitischen Widerstände. Die Erkenntnis ist eingangs insbesondere auch für die Verwendung der Titanmischoxidbänder als Pseudo-Referenzelektrode bei **Versuchsreihe B** wichtig. Sofern die Phasenwinkel der Referenzelektroden bei der Messung nicht klein bleiben, kann die Messung fehlerhaft sein. Referenzelektroden sollten aufgrund des sonst steigenden IR-Fehlers und der dadurch bedingten Verzerrung der Messergebnisse generell niederohmig sein [151] und Phasenwinkel nahe „Null“ bei hohen Frequenzen aufweisen [152]. Die verwendeten Pseudoreferenzelektroden sind aufgrund des fehlenden zusätzlichen Elektrolyten in dieser Hinsicht jedoch weniger störanfällig, da beispielsweise keine Entkopplungen durch Gasblasen an der Kapillare oder eine Austrocknung des Elektrolytpuffers entstehen können.

Bei den Korrosionsversuchen wurde der absolute Elektrolytwiderstand R_{el} zwischen der Messanode und der Ti/MMO-Messkathode vor und nach der Wärmebehandlung und Ruhephase sowie regelmäßig bei Zusatzmessterminen erfasst. Die Elektrolytwiderstände vor und nach der Wärmebehandlung und Ruhephase sind in **Anhang A, Abb. A.1 - 1** und **Abb. A.1 - 2**

ersichtlich. Der Verlauf der Elektrolytwiderstände ist nachfolgend für Serie I/0,5/2,5 aus **Versuchsreihe B** in **Abb. 36** und für alle Serien in **Anhang A**, **Abb. A.2 - 10** bis **Abb. A.2 - 16** dargestellt. Die gemittelten Werte über den gesamten Messzeitraum des Kurzschlusses von Messanoden und Messkathoden aus **Versuchsreihe B** sind in **Abb. 37** dargestellt.

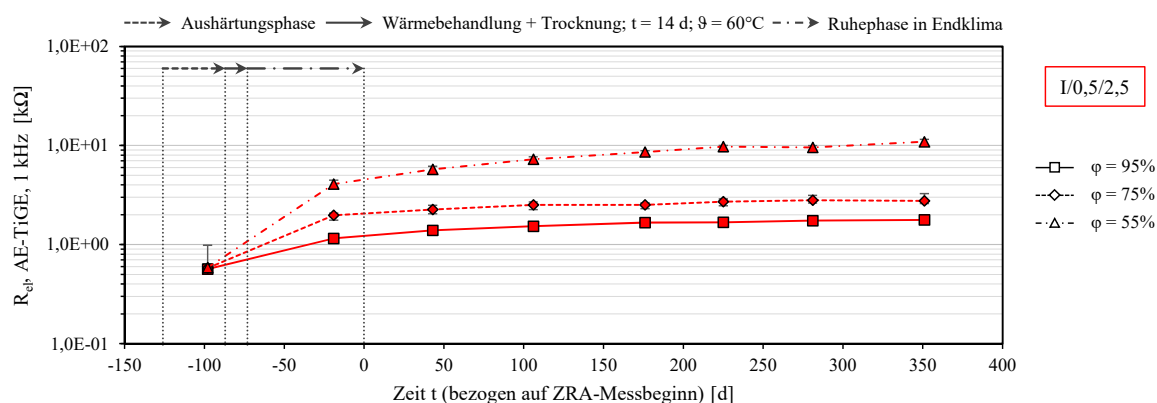


Abb. 36: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie I/0,5/2,5 zwischen Messanode und Ti/MMO-Genelektrode, $f = 1$ kHz – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

Abweichend zu den kleinen Prismen der **Versuchsreihe A** besitzen die größeren Zylinderproben aus **Versuchsreihe B** ein ausgeprägteres zeitabhängiges Verhalten der Elektrolytwiderstände, was auf unterschiedliche Feuchteverteilungen über den Probenquerschnitt rückführbar ist. Ziel der zehnwöchigen Ruhephase von **Versuchsreihe B** war die Vergleichmäßigung der Feuchtegehalte nach der beschleunigten Trocknung, welche vorerst zu einer trockenen Randzone und einem feuchteren Kernbereich in der Probe führte. Beim zeitlichen Verlauf von R_{el} zeigt sich erwartungsgemäß ein anfänglich deutlicher Widerstandssprung durch die Wärmebehandlung und Ruhephase. Dieser ist insbesondere beim direkten Vergleich vor und nach der Vorschädigungsphase für alle Serien in **Anhang A**, **Abb. A.1 - 1** und **Abb. A.1 - 2** erkennbar. Offensichtlich ist allerdings auch, dass trotz ähnlicher Probenfeuchten über den gesamten Untersuchungszeitraum, wie in **Anhang A**, **Abb. A.2 - 3** bis **Abb. A.2 - 9** gezeigt, R_{el} insbesondere bei einer Lagerungsfeuchte von $\phi = 55\%$ weiter ansteigt. Dabei ist die Widerstandserhöhung bei niedrigeren Chloridgehalten und den CEM I-Proben ausgeprägter. Der Anstieg ist ein Indiz einer noch nicht vollständig abgeschlossenen Umverteilung der Feuchte in den Betonproben. Dieses Verhalten zeigt sich in einer höheren Streuung der gemittelten Werte aus der Lagerung bei $\phi = 55\%$ in **Abb. 37**.

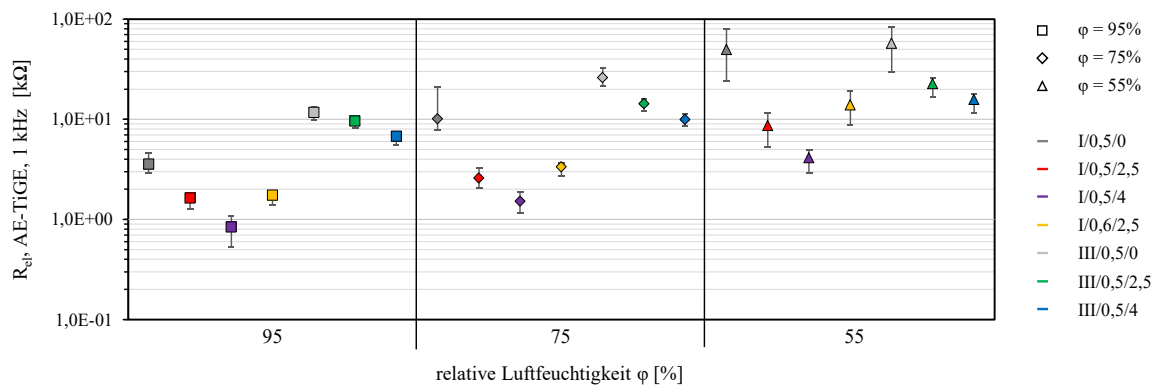


Abb. 37: Gemittelte Elektrolytwiderstände zwischen Messanoden und Messkathoden während ZRA-Zeitraum, Streubreite entspricht größten gemessenen Extrema während der Laufzeit – **Versuchsreihe B**

Die Überprüfung des Feuchteausgleichs über den Probenquerschnitt erfolgt bei **Versuchsreihe B** in **Tabelle 6** über ein serienspezifisches Verhältnis von R_{el} bei der jeweiligen Lagerungsfeuchte bezogen auf die 95 %-Feuchtestufe für die chloridhaltigen Betone. Bei einer gleichmäßigen Feuchteverteilung sind die Ausbreitungswiderstände an jeder Stelle identisch und das Verhältnis von R_{el} aus **Versuchsreihe B** entspricht etwa dem Verhältnis aus **Versuchsreihe A**. Erst ab diesem Zeitpunkt besitzen die Proben aus **Versuchsreihe B** einen konstanten Geometriefaktor k , analog zu **Versuchsreihe A**.

Tabelle 6: Faktorisierung der Elektrolytwiderstände aus den einzelnen Lagerungsfeuchten bezogen auf die 95 % Lagerungsfeuchte

ϕ [%]	I/0,5/2,5		I/0,5/4		I/0,6/2,5		III/0,5/2,5		III/0,5/4	
	$R_{el} \phi / R_{el} \phi = 95 \% [-]$									
	75	55	75	55	75	55	75	55	75	55
A	2,3	7,0	2,3	7,0	2,6	9,2	1,9	4,3	1,8	3,7
B ZRA-Start	1,7	3,5	1,9	3,9	1,9	4,6	1,3	1,6	1,4	1,6
B ZRA-Ende	1,5	6,1	1,8	5,0	1,9	9,7	1,5	2,5	1,4	2,4

Die Faktoren zwischen **Versuchsreihe A** und **Versuchsreihe B** bei Beginn (ZRA-Start) und Ende (ZRA-Ende) des Kurzschlusszeitraums haben sich bei $\phi = 75 \%$ über die Versuchszeit der Korrosionsversuche kaum geändert. Die durchweg niedrigeren Werte von **Versuchsreihe B** sind vermutlich auf eine konstante Abweichung beider Versuchsreihen

zurückzuführen. Demnach lag bei den Proben hier bereits eine annähernd gleiche Feuchteverteilung über den Querschnitt vor. Bei $\varphi = 55\%$ ist eine deutliche Annäherung der Proben aus **Versuchsreihe B** an **Versuchsreihe A** über den Messzeitraum erkennbar. Ein vollständiger Feuchteausgleich hat aber nach über einem Jahr noch nicht stattgefunden. Interessanterweise sind die Faktoren der Klimastufen bei alleiniger Variation des Chloridgehalts im Beton bei **Versuchsreihe A** relativ ähnlich und mehr durch Änderung des Bindemittels oder w/z-Werts beeinflusst. Dies lässt darauf schließen, dass die Leitfähigkeit mehr durch die Porenstruktur und den Feuchtegehalt durch die Hygroskopizität als durch den zusätzlichen Ionengehalt aus der Natriumchloridzugabe beeinflusst ist.

5.2.4 ERKENNTNISSE

Die dargestellten Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß eine eindeutige Abhängigkeit der Elektrolytwiderstände R_{el} von der Probenfeuchte. Während der Widerstandsanstieg von $\varphi = 95\%$ auf $\varphi = 75\%$ mit einem Faktor von rd. 2 relativ gering ausfällt, ist der Sprung von $\varphi = 95\%$ auf $\varphi = 55\%$ mit einem Faktor bis zu rd. 9 deutlich stärker. Bei den CEM I-Proben konnten die ermittelten Ausgleichsfeuchten aus **Versuchsreihe A** an **Versuchsreihe B** seit Beginn der Korrosionsversuche relativ genau erreicht werden, wohingegen die CEM III/A-Proben aufgrund des erläuterten Zementwechsels zum „KoMICS“-Forschungsprojekt deutlich oberhalb ihrer Ausgleichsfeuchte lagen. Nach der beschleunigten Trocknung von 60 °C hat sich hier im Untersuchungszeitraum von einem Jahr nur wenig Änderung im Feuchtegehalt an **Versuchsreihe B** ergeben, was darlegt, wie langwierig eine Trocknung eines feuchten Bauteils am Bauwerk erwartungsgemäß verlaufen wird. Trotz der gleichmäßigen Probenfeuchte der CEM I-Proben über die Untersuchungszeit fand eine Feuchteumlagerung innerhalb der Proben statt, die bei der trockensten Lagerungsfeuchte von $\varphi = 55\%$ teilweise nach dem Jahr Untersuchungszeit noch keine vollständige Vergleichmäßigung erreichte.

5.3 EINFLUSS DER TROCKNUNG AUF KORROSIONSRELEVANTE PARAMETER DER MESSELEKTRODEN

5.3.1 ALLGEMEINES

Nachfolgend werden die Einflüsse der untersuchten Feuchtestufen der Proben auf die korrosionsrelevanten Parameter dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse aus der durchgeführten Vorschädigung und den Zusatzmessterminen dargestellt und interpretiert. Bei den Zusatzmessterminen wurden die freien Korrosionspotentiale E_{OC} und die Polarisationswiderstände R_p neben den bereits dargestellten Elektrolytwiderständen R_{el} erfasst. Zusätzlich erfolgt die Darstellung der ermittelten Korrosionspotentiale E_{korrr} im Kurzschluss sowie der Makroelementströme I_{makro} mit den zugehörigen elektrochemisch ermittelten Masseverlusten Δm_{makro} , die für die spätere Ermittlung der Eigenkorrosionsanteile essentiell sind.

5.3.2 EINFLUSS DER VORSCHÄDIGUNG

Die Auswirkungen der in **Kapitel 4.3** beschriebenen Vorschädigungen auf die E_{OC} der Messanoden sind bei **Versuchsreihe B** in **Anhang A, Abb. A.1 - 3 bis Abb. A.1 - 4** dargestellt. Nachfolgend sind in **Abb. 38** und **Abb. 39** die Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ aus **Versuchsreihe B** dargestellt.

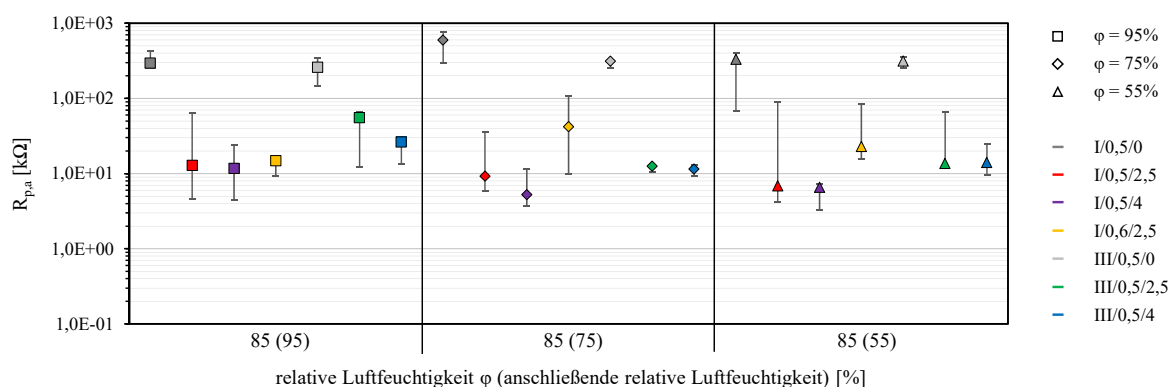


Abb. 38: Polarisationwiderstände R_p der Messanoden aller Serien vor der Wärmebehandlung; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

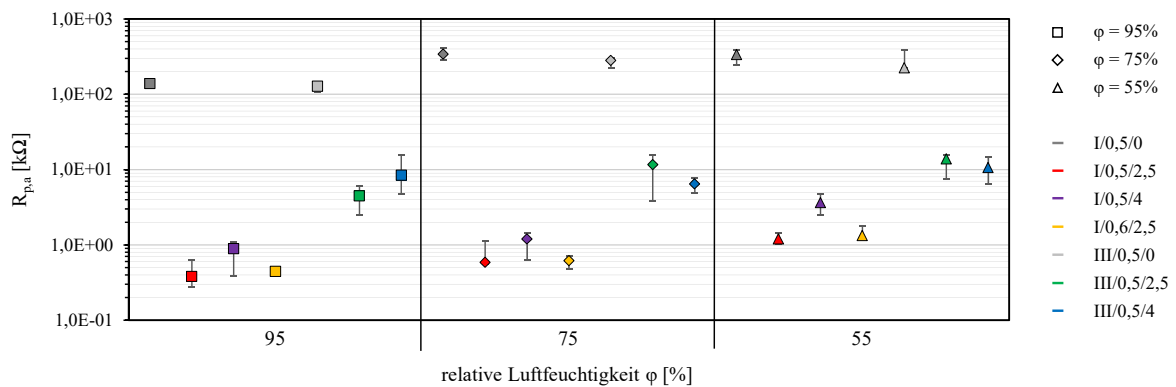


Abb. 39: Polarisationswiderstände R_p der Messanoden aller Serien **nach** der Wärmebehandlung und Ruhephase; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

Bei **Versuchsreihe B** führte die Wärmebehandlung und Ruhephase zu einer deutlichen Reduktion der Streuungen bei den $E_{OC,a}$ und $R_{p,a}$. Dies ist insbesondere dadurch zu begründen, dass nur ein Teil der chloridhaltigen Proben vor der Vorschädigung korrosionsaktiv war und durch die Wärmebehandlung und Ruhephase alle Proben aktiv wurden. Bei den chloridhaltigen Serien ergaben sich, insbesondere bei den CEM I-Betonen, meist um eine Dekade kleinere $R_{p,a}$ -Werte, die alle auf eine deutlich gestiegene Korrosionsaktivität deuten. Auch wenn die $E_{OC,a}$ vor der Vorschädigung teilweise negativer lagen, so sind nach der Vorschädigung die Werte innerhalb einer Feuchtestufe deutlich einheitlicher. Je nach Feuchte- und Chloridgehalt schwanken die Werte hier zwischen rd. -700 mV und -200 mV. Die chloridfreien Proben weisen ein relativ einheitliches $E_{OC,a}$ vor der Wärmebehandlung bei rd. -200 mV vs. CSE auf. Nach der Vorschädigung steigt dieser Wert relativ feuchteunbeeinflusst auf rd. -50 bis -120 mV vs. CSE. Diese Bereiche markieren vorliegend passive Regionen. Bei einigen Proben, deren $E_{OC,a}$ bereits vor der Wärmebehandlung sehr negativ waren, fand ebenfalls ein Abfall der $R_{p,a}$ -Werte statt, obwohl die Potentiale nach der Wärmebehandlung und Ruhephase bedingt durch die Trocknung positiver wurden. Der Anteil an depassivierter Oberfläche ist hier vermutlich gestiegen. Die Proben aus 55 % Luftfeuchte weisen in Relation die höchsten $R_{p,a}$ -Werte auf. Der geringste Einfluss aus der Wärmebehandlung und Ruhephase ist bei den CEM III/A-Proben festzustellen, was insbesondere auf die in **Kapitel 5.2.2** beschriebenen Abweichungen der Feuchtegehalte von **Versuchsreihe B** zu den Desorptionsisothermen zurückzuführen ist.

5.3.3 FREIE KORROSIONSPOTENTIALE UND POLARISATIONSWIDERSTÄNDE

Über den Untersuchungszeitraum der Korrosionsversuche wurden regelmäßig die freien Korrosionspotentiale E_{oc} und die Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Messanoden erfasst. Dies geschah vor der Wärmebehandlung sowie kurz vor Beginn der Kurzschlussmessungen und zu weiteren regelmäßigen Zeitpunkten im Abstand von rd. 2 Monaten während der Lagerung in den definierten Klimata. Zur Ermittlung der Polarisationswiderstände wurden die Proben potentiodynamisch nach **Kapitel 4.4.5** gemessen. Die zeitlichen Verläufe aller Serien können **Anhang A, Abb. A.3 - 1 bis Abb. A.3 - 21** entnommen werden.

Die zeitlichen E_{oc} -Verläufe der Messanoden von Serie I/0,5/2,5 aus **Abb. 40** zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Potentialverläufe von den Feuchtezuständen, die auch bei den gemittelten Werten über den Versuchszeitraum in **Abb. 41** gut erkennbar sind: bei niedrigen Feuchtegehalten ergeben sich positivere Potentiale. Hinsichtlich der zeitlichen Veränderung der Potentiale zeigt sich nur eine geringe Abhängigkeit, wobei sich Proben in hohen Feuchtegehalten tendenziell stärker über die Zeit verändern – und zwar in positive Richtung. Nach Beginn der Kurzschlussmessungen ist in den Feuchtestufen 95 % und 75 % ein Abfall der Potentialwerte beim ersten Messtermin nach dem Kurzschluss zu erkennen. Dies ist mit einer gesteigerten Korrosionsaktivität durch den Kurzschluss erklärbar und ist mit steigender Probenfeuchte ausgeprägter. Bei der 55 %-Feuchtestufe ist, außer bei Serie I/0,5/4, welche die höchste Elektrolytleitfähigkeit aller Betone und die höchste Probenfeuchte der CEM I-Betone besitzt, kein Potentialabfall an dieser Stelle mehr zu verzeichnen. 281 d nach Beginn des Kurzschlusses findet serienübergreifend ein Einbruch der Potentialwerte in der 55 %-Feuchtestufe statt. Hier führte ein vorheriger Defekt der Klimatisierung für 5 d nach dem letzten Messzeitpunkt zu einem Anstieg der Luftfeuchte auf rd. 77 %. Der Einfluss machte sich nach kurzer Zeit in den Messergebnissen bemerkbar und ist auch bei den Elektrolytwiderständen in **Abb. 36** in geringer Ausprägung zu erkennen. In der Gesamtbetrachtung der gemittelten Messwerte über den Kurzschlusszeitraum zwischen Messanode und Messkathode erkennt man tendenziell auch die positiveren Potentialwerte mit abnehmender Feuchte, wobei sich feuchteübergreifend aufgrund der Streuungen Überschneidungen ergeben.

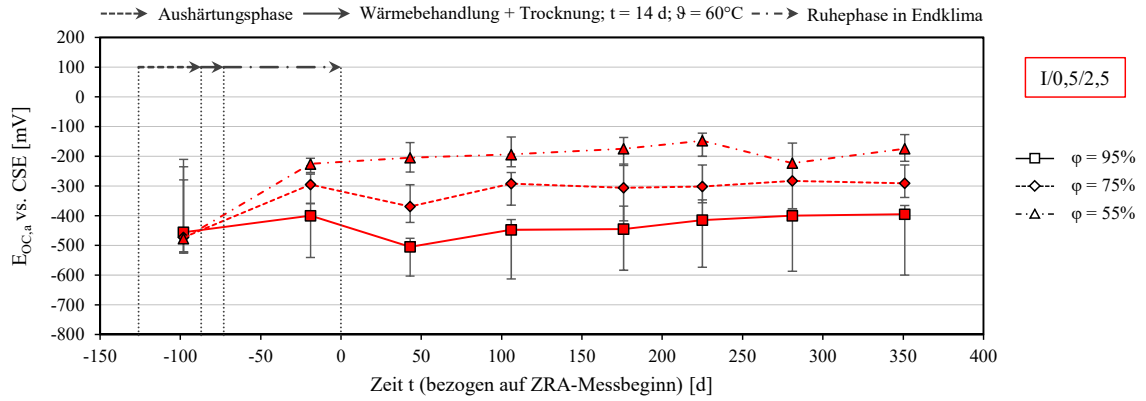


Abb. 40: E_{OC} der Messanoden vs. CSE der Serie I/0,5/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

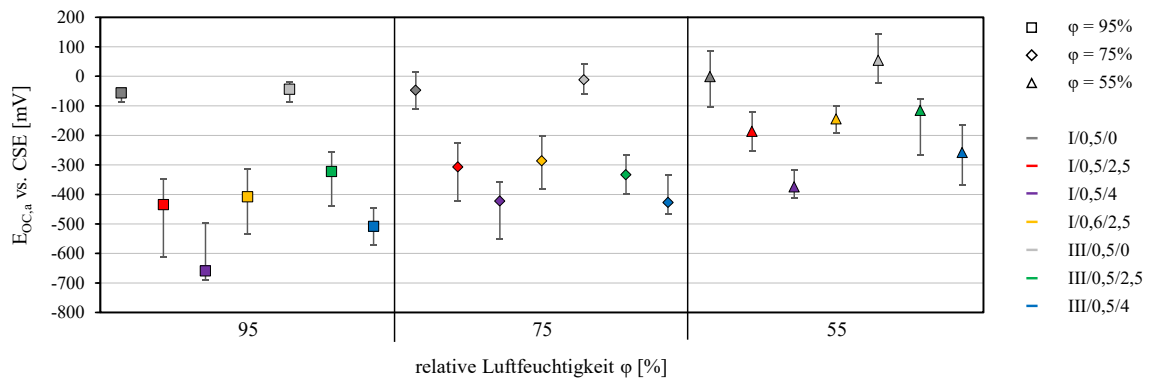


Abb. 41: Gemittelte E_{OC} der Messanoden während ZRA-Zeitraum, Streubreite entspricht gemessenen Extrema während der gesamten Laufzeit – **Versuchsreihe B**

Deutlich stabiler im Vergleich zu den Messanoden verhalten sich die E_{OC} der Messkathoden, die sich bei den chloridhaltigen Betonen zeitabhängig in **Abb. 42** relativ konstant zwischen meist 100 - 150 mV vs. CSE befinden und verglichen zu den Messanoden nur moderaten Schwankungen unterworfen sind. In der Betrachtung der gemittelten Werte über den Kurzschlusszeitraum in **Abb. 43** ist dies am besten erkennbar. Da die Messkathoden im Aufbau den Pseudo-Referenzelektroden entsprechen, sind letztere nicht gesondert dargestellt. Bei den chloridfreien Betonen liegen die $E_{OC,k}$ positiver und streuen auch stärker mit höherer Trockenheit der Proben, was hier primär auf die geringere Betonfeuchte im Vergleich zu den chloridhaltigen Proben zurückgeführt wird. Die Trockenheit erschwert einen korrekten Abgleich mit der externen Referenzelektrode, da eine Potentialstabilisierung deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt, was sich mit Ergebnissen aus [111] deckt.

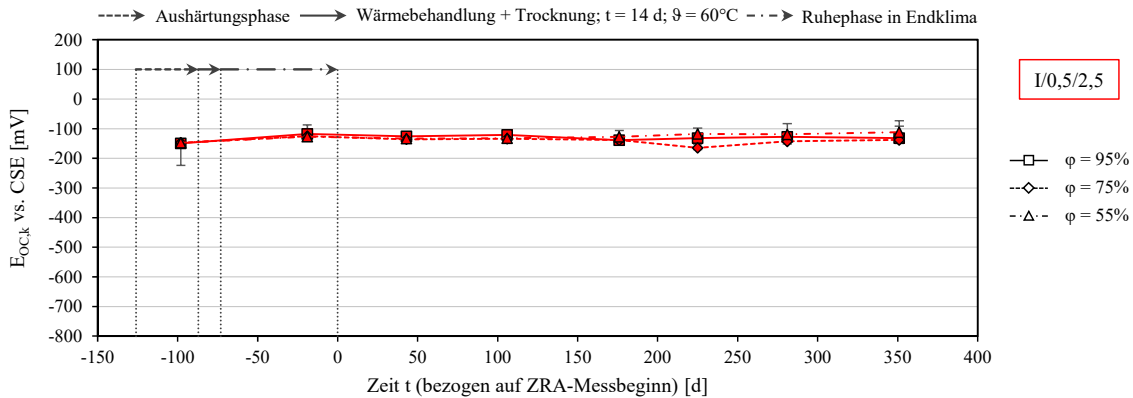


Abb. 42: EOC der Messkathoden vs. CSE der Serie I/0,5/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

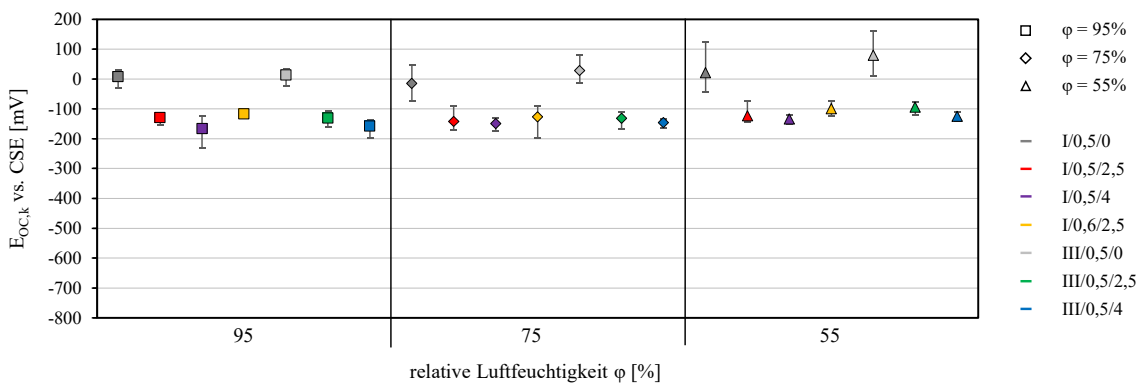


Abb. 43: Gemittelte EOC der Messkathoden während ZRA-Zeitraum, Streubreite entspricht gemessenen Extrema während der gesamten Laufzeit – **Versuchsreihe B**

Bei den Polarisationswiderständen der Messanoden $R_{p,a}$ zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den zugehörigen E_{oc} -Werten. Vergleicht man in **Abb. 44** den zeitlichen Verlauf aus Serie I/0,5/2,5, so erkennt man ebenfalls einen deutlichen Unterschied der Werte in Abhängigkeit der Lagerungsfeuchte. Abnehmende Feuchtegehalte führen zu höheren Polarisationswiderständen, was letztendlich auf geringere Korrosionsaktivitäten rückführbar ist. Insgesamt streuen die $R_{p,a}$ bezogen auf ihren jeweiligen Median deutlich weniger als die E_{oc} . Bei der 95 %-Lagerungsstufe ist analog zu den E_{oc} -Verläufen ein Einbruch der $R_{p,a}$ im ersten Messtermin nach dem Kurzschluss durch die gestiegene Korrosionsaktivität zu erkennen, der sich allerdings in der 75 %-Lagerungsstufe nur noch in wenigen Serien zeigt, vgl. **Anhang A, Abb. A.3 - 15** bis **Abb. A.3 - 21**. Eine ausgeprägte zeitabhängige Passivschichtbildung, wie sie in *Beck* [12] er-

läutert wird, kann hier nicht festgestellt werden. Dies kann an der hier kürzeren Versuchslaufzeit liegen, ist aber vermutlich maßgeblich auf eine beschleunigte Alterung durch die Wärmebehandlung und Ruhephase zurückzuführen. Eine auffällige Besonderheit stellt der Einbruch der $R_{p,a}$ aus Serie I/0,5/4 in **Anhang A, Abb. A.3 - 17** am Messpunkt nach 106 d Kurzschlusszeit dar. Diese Ursache wird in nachfolgendem **Kapitel 5.3.4** diskutiert.

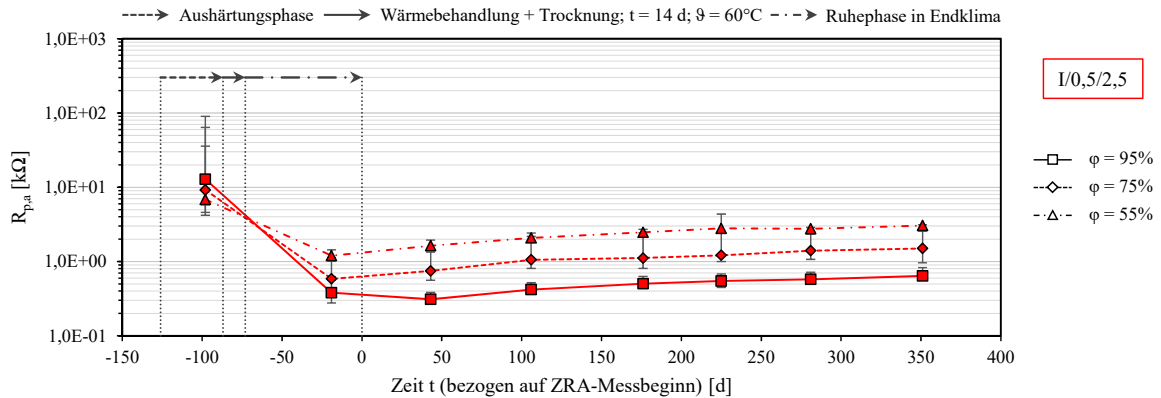


Abb. 44: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie I/0,5/2,5 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

Bei Betrachtung der gemittelten $R_{p,a}$ über den Untersuchungszeitraum in **Abb. 45** ergibt sich ein vergleichbares Bild wie bei den E_{OC} - und R_{el} -Werten. Erkennbar ist ebenfalls die feuchteabhängige Staffelung, wobei die Polarisationswiderstände der Proben mit CEM I-Beton und höherem Chloridgehalt am niedrigsten liegen und sich dementsprechend am korrosionsaktivsten abzeichnen. Während die w/z-Wert-Variation aus Serie I/0,5/2,5 und I/0,6/2,5 nur wenig Einfluss auf die Werte hat, ergibt sich ein deutlicher Sprung der Polarisationswiderstände zwischen den untersuchten Zementarten. Die $R_{p,a}$ der CEM III/A-Betone liegen in etwa eine Dekade über den Werten der CEM I-Betone bei jeder Feuchtestufe, was auf eine deutlich geringere Korrosionsaktivität der Stähle bei den CEM III/A-Zementen schließen lässt. Berücksichtigt werden müssen hier noch die nicht vollständig erreichten Desorptionsfeuchtegehalte der CEM III/A-Betone. Bei deren vollständigen Ausgleichsfeuchtegehalten sind noch deutlich höhere Polarisationswiderstände bei $\phi = 75\%$ und $\phi = 55\%$ zu erwarten. Deutlich höher als die chloridhaltigen Betone liegen die chloridfreien Betone mit den passiven Stählen. Deren $R_{p,a}$ -Werte liegen im Bereich bis über 100 kΩ, wobei hier die eindeutige Differenzierbarkeit nach Bindemittelart nicht mehr gegeben ist.

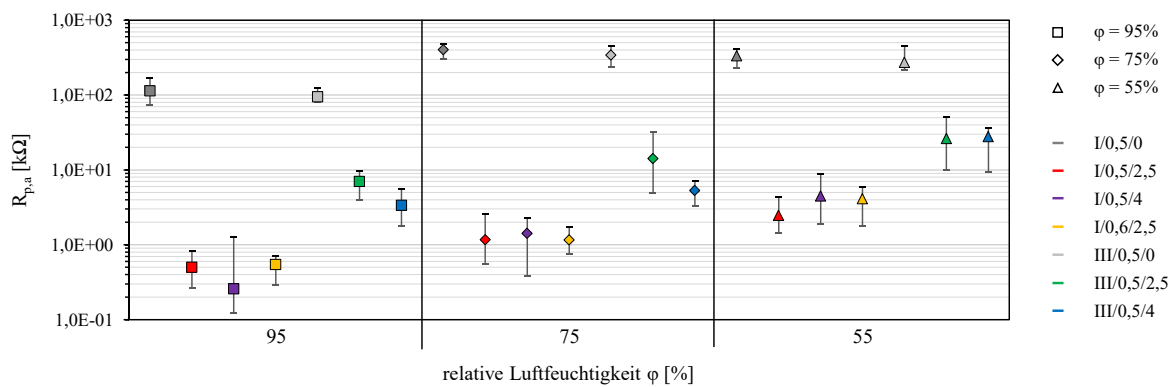


Abb. 45: Gemittelte Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Messanoden während ZRA-Zeitraum, Streubreite entspricht gemessenen Extrema während der gesamten Laufzeit – **Versuchsreihe B**

5.3.4 MAKROELEMENTSTRÖME UND ELEKTROCHEMISCH ERMITTELTE MASSEVERLUSTE

Die Verläufe der Korrosionspotentiale E_{korrr} , der Makroelementströme I_{makro} und der daraus errechneten Masseabträge Δm_{makro} nach dem Faradayschen Gesetz aus **Gleichung 14** in **Kapitel 2.1.5** sind nachfolgend in **Abb. 46** und **Abb. 47** exemplarisch für Serie I/0,5/2,5 und eine relative Luftfeuchtigkeit von $\phi = 75\%$ dargestellt. Eine vollständige Übersicht aller Verläufe ist in **Anhang A, Abb. A.4 - 1** bis **Abb. A.4 - 30** für **Versuchsreihe B** gegeben. Die Makroelementströme werden mit positivem Vorzeichen angegeben, wenn eine Auflösung an der Messanode stattfindet, die einen Elektronenfluss im Metall zur Messkathode bewirkt.

Die Diagramme beziehen sich jeweils auf den kompletten ZRA-Zeitraum mit annähernd konstanter Probenfeuchte. Die Kurven zeigen die Verläufe der jeweiligen Mediane je Serie und Lagerungsfeuchte sowie die dazugehörigen Minima und Maxima. Die Fehlerindikatoren markieren gleichzeitig den einzelnen Zeitpunkt jeder Messung. Zu beachten ist, dass Mediane, Minima und Maxima dabei alle betroffenen Proben umfassen und nicht jeweils stets der gleichen Probe entsprechen. Einzelne Peaks in den Verläufen können einerseits aus Zeitpunkten nach den Zusatzmessterminen, an denen der Kurzschluss kurzzeitig aufgehoben war und noch nicht vollständig ein konstantes Niveau erreicht hat, resultieren. Andererseits können sich damit neue Korrosionsereignisse abzeichnen, an denen beispielsweise neue Lochkorrosionsnarben entstehen. In **Abb. 46** ist ersichtlich, dass durch kurzzeitige Messspitzen der errechnete Masseabtrag

allerdings kaum beeinflusst ist. Sämtliche I_{makro} wurden bei Werten kleiner als 10 nA nicht mehr in den Diagrammen dargestellt, da diese Werte bei dem verwendeten Versuchssetup eine nicht vorhandene Genauigkeit suggerieren würden.

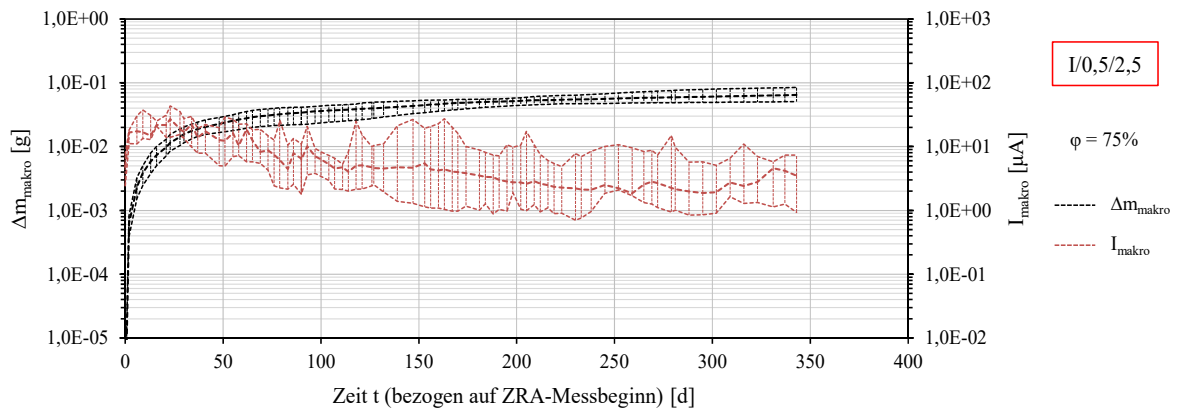


Abb. 46: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\varphi=75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

Vergleicht man die Verläufe aus Korrosionspotentialen und Makroelementströmen in **Anhang A, Abb. A.4 - 1 bis Abb. A.4 - 30**, so ergibt sich bei allen Serien ein ähnliches Bild. Höhere Lagerungsfeuchten der chloridbelasteten Betone resultieren in negativeren E_{kor} und höheren I_{makro} . Ebenso wie bei den Ergebnissen der Zusatzmesstermine führen höhere Chloridgehalte und die CEM I-Betone im Vergleich zu den CEM III/A-Betonen erwartungsgemäß zu höheren Korrosionsraten. Der Unterschied durch Variation des w/z-Werts ist gegenüber den anderen Einflussgrößen, analog der Zusatzversuche, relativ gering.

Über die Zeit zeichnet sich bei allen Serien trotz der annähernd konstanten Probenfeuchte ein stetiger Anstieg von E_{kor} ab, der mit einer Abnahme von I_{makro} begleitet wird und exemplarisch in **Abb. 47** zu sehen ist. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Zusatzmesstermine und kann sowohl auf den weiteren Anstieg der Elektrolytwiderstände R_{el} durch die weitere Umverteilung der Probenfeuchte als auch auf den Anstieg der Polarisationswiderstände der Messanoden $R_{\text{p,a}}$ zurückgeführt werden. Der Polarisationswiderstandsanstieg wird einerseits in der Bildung von Deckschichten aus Korrosionsprodukten gesehen, die einen weiteren Ladungsdurchtritt an der Lochnarbe hemmen und mit Ergebnissen aus [12] vergleichbar sind. Andererseits finden mit der Zeit Transportprozesse von Chloridionen zum Lochgrund der Narben

verzögert statt, was von *Raupach* [22] analog bei abnehmenden Elementströmen über die Zeit beschrieben wird.

Zu erkennen ist ebenfalls, dass die Potentialverläufe von E_{kor} meist eine sehr gute Übereinstimmung mit den Makroelementströmen I_{makro} aufweisen. Beide Verläufe in den Diagrammen entsprechen in ihrer Tendenz näherungsweise einer Spiegelsymmetrie an einer Parallelen zur Abszisse: wird E_{kor} positiver, dann sinkt I_{makro} .

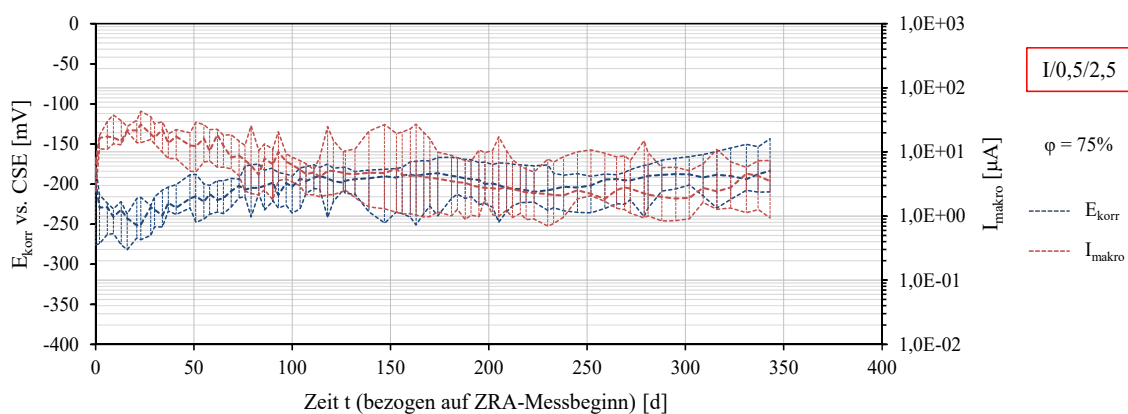


Abb. 47: Korrosionspotentiale E_{kor} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\varphi=75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

Unerwartet sind bei Serie I/0,5/4 an den Proben bei 95 % Lagerungsfeuchte im Vergleich zu 75 % Lagerungsfeuchte anfänglich deutlich geringere Beträge von I_{makro} im Kurzschluss messbar gewesen, vgl. **Anhang A, Abb. A.4 - 10**. Eine mögliche Ursache kann bei der Messkathode liegen, die einer Hemmung durch die Sauerstoffarmut bei der hohen Probenfeuchte unterliegen könnte und die mit Wassertropfenbildung auf der Betonoberfläche gekennzeichnet war. Eine Lagerung der Proben für mehrere Stunden außerhalb des Klimaschranks führte zu einem Anstieg von I_{makro} , was diese Vermutung stützt. Auch die in **Tabelle 3** in **Kapitel 4.5** gezeigten geringeren Blindprobenwerte der Serien I/0,5/4 im Vergleich zu Serie I/0,5/2,5 deuten auf eine kathodische Hemmung hin, die ebenfalls auf vorhandenen Kathodenflächen an der Messanode stattfindet. Der Anstieg der Korrosionsaktivität zeichnet sich in den kleineren Polarisationswiderständen der Messanode ab, deren Sprung bei Serie I/0,5/4 erst beim zweiten Zusatzmesstermin nach Kurzschlussstart in **Anhang A, Abb. A.3 - 17** erkennbar ist.

Der in **Kapitel 5.3.3** erwähnte kurzzeitige Defekt der Klimatisierung bei $\varphi = 55\%$ führte innerhalb kürzester Zeit bei allen CEM I-Serien nach 281 d im Kurzschluss zu einem unterschiedlich stark ausgeprägten Anstieg von I_{makro} und einem Abfall von E_{korrr} . Die CEM III/A-Proben reagierten hierbei weniger sensibel auf die Feuchteänderung, was maßgeblich auf die dichtere Struktur und den daraus verzögerten Adsorptionsvorgang zurückzuführen ist.

Bei allen Serien mit chloridhaltigen Betonen lagen die Korrosionsströme über den ermittelten Passivströmen aus den Referenzserien, die sich durchweg im Bereich von pA bis weniger nA befanden und aufgrund der geringen Größe auch mit gewisser Vorsicht hinsichtlich der Messgenauigkeit zu betrachten sind.

5.3.5 ERKENNTNISSE

Über die durchgeführte Wärmebehandlung konnte zeitgleich eine Trocknung der Proben und eine Vorschädigung der Messanoden erreicht werden. Im Korrosionssystem bedingen sich letztendlich alle Werte gegenseitig, weshalb sich eine geringere Probenfeuchte auf alle korrosionsrelevanten Parameter auswirkt. So sind die freien Korrosionspotentiale $E_{\text{OC},a}$ der Messanoden sowie die Korrosionspotentiale E_{korrr} im Kurzschluss bei geringeren Feuchtegehalten der Proben positiver. Aufgrund der dadurch höheren Elektrolytwiderstände R_{el} und geringeren Treibspannungen zwischen Messanode und -kathode ($E_{\text{OC},k} - E_{\text{OC},a}$) verringern sich die Makroelementströme I_{makro} und die Polarisationswiderstände $R_{\text{p},a}$ der Messanoden steigen entsprechend an. Doch auch bei annähernd gleichbleibender Probenfeuchte über die Zeit nimmt I_{makro} und demnach der elektrochemisch ermittelte Masseverlust Δm_{makro} ab, was auf Deckschichtbildungen und Ablagerung von Korrosionsprodukten um die Messanode herum rückgeführt wird.

5.4 MAßGEBENDE STEUERUNGSPARAMETER DER KORROSION BEI TROCKNUNG

5.4.1 ALLGEMEINES

Aus den in **Kapitel 5.2** und **Kapitel 5.3** gezeigten Untersuchungen ist ersichtlich, dass alle korrosionsrelevanten Parameter durch den Feuchtegehalt der Proben maßgeblich mit beeinflusst werden. Um zu klären, welche Teilprozesse die Korrosionsaktivitäten bei unterschiedlichen Feuchtegehalten dominierend beeinflussen, wurden an Probekörpern der **Versuchsreihe B** aus Serie I/0,5/2,5 Zusatzversuche zur Korrosionskinetik durchgeführt. Dazu wurden die Systemwiderstände und Treibspannungen aus **Gleichung 13** nach dem Ersatzschaltbild in **Abb. 7** in **Kapitel 2.1.5** separat an den Zusatzproben in nachfolgendem **Kapitel 5.4.3** ermittelt. **Gleichung 13** ist hierfür noch einmal gegeben:

$$I_{makro} = \frac{\Delta E}{R_{p,a} + R_{p,k} + R_{el}} = \frac{E_{OC,k} - E_{OC,a}}{R_{p,a} + R_{p,k} + R_{el}} \quad \text{Gleichung 13}$$

Die somit errechneten Makroelementströme I_{makro} werden den gemessenen I_{makro} nach **Kapitel 5.4.3** gegenübergestellt. Die gemessenen I_{makro} dienen dabei als Verifizierung, dass die ermittelten Systemparameter plausibel sind. Ergänzend werden die ermittelten anodischen Strom-Spannungskurven der CEM I-Serien in **Kapitel 5.4.4** verglichen.

Die Proben wiesen zum Zeitpunkt der Untersuchungen ein Alter von insgesamt rd. 18 Monaten auf. Abweichend zu den Zusatzmessterminen über die Versuchszeit wurden dabei die Polarisationswiderstände mittels potentiostatischen Halteversuchen nach **Kapitel 4.4.5** ermittelt, wodurch deutlich bessere stationäre Bedingungen und daher realitätsnähere Werte erreicht werden.

5.4.2 VERSUCHSANORDNUNG ZUR ERMITTLUNG DER STEUERUNGSPARAMETER

Um auch die Ti/MMO-Elektroden potentialgesteuert polarisieren zu können, wurde eine extern angekoppelte SSE verwendet, die über eine separate Kapillare mittels Ultraschallgel an die Proben ankontaktiert wurde. Die Phasenwinkel der Impedanzmessung zwischen externer

Referenzelektrode und Arbeitselektrode ergaben bei allen Versuchen durchweg im Betrag niedrige Werte, woraus gute Ankopplungen zu jedem Messzeitpunkt geschlussfolgert werden können. Die Art der Ankopplung kann nachfolgender **Abb. 48** entnommen werden. Für die nachfolgenden Messungen der Systemwiderstände an Zusatzproben aus Serie I/0,5/2,5 wurde eines der beiden Titanbänder (K1) erst als Referenzelektrode bei den Messungen der Bewehrungstahlelektrode verwendet. Anschließend wurde das Band selbst für die Zusatzversuche als Arbeitselektrode verwendet. Das im Aufbau identische Band K2 diente als Gegenelektrode für alle Messungen.

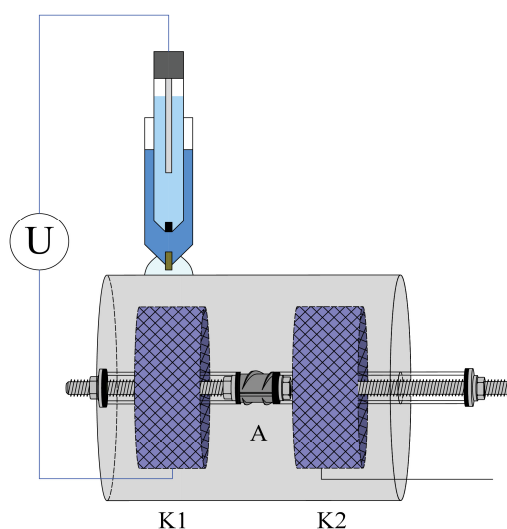


Abb. 48: Schematische Position der externen SSE mit Ultraschallgel-Ankopplung bei Verwendung von K1 als Arbeitselektrode, **Versuchsreihe B**

5.4.3 STEUERUNGSPARAMETER DES MAKROELEMENTSTROMS

Ein Hauptproblem bei der Messung von Polarisationswiderständen R_p um das freie Korrosionspotential E_{oc} ist das Fehlen einer ausreichend großen anodischen Potentialverschiebung auf der Strom-Potentialkurve, die durch die Potentialdifferenz der jeweiligen E_{oc} aus Messanode und Messkathode im Kurzschluss stattfindet. R_p -Messungen eignen sich daher nur bei gleichförmiger Korrosion zur Bestimmung eines Masseabtrags [136, 144]. Die Zusatzproben wurden nach Erfassung der E_{oc} -Werte deshalb über 12 h in den Kurzschluss Messanode zu Messkathode versetzt, der zu quasistationären Verläufen von I_{makro} führte. In diesem Zustand wurde sowohl I_{makro} über eine ZRA-Messung erfasst, als auch die Korrosionspotentiale E_{kor} der jeweiligen Elektroden im Kurzschluss vs. SSE gemessen. Aus diesen Messungen konnte die

Treibspannung als Differenz der freien Korrosionspotentiale ebenso ermittelt werden wie auch die Potentialshifts der Anoden und der Kathoden durch den Kurzschluss. **Abb. 49** zeigt, dass die Summe der beiden Shifts annähernd der Treibspannung entspricht und dass die Anode durch den Kurzschluss stärker polarisiert wird als die Kathode.

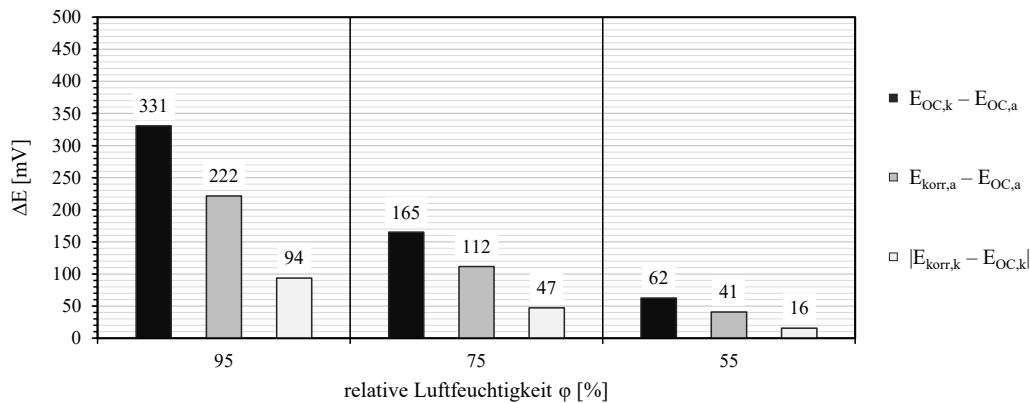


Abb. 49: Treibspannung Anode zu Kathode und Potentialshifts aus Serie I/0,5/2,5 nach >12 h Kurzschluss – **Versuchsreihe B**

Nach Auftrennen des Kurzschlusses und Erreichen stabiler E_{OC} wurden die Polarisationswiderstände der Messanoden $R_{p,a}$ und Messkathoden $R_{p,k}$ sowohl vs. E_{OC} als auch nach künstlicher Auslenkung in Richtung der Potentialshifts $E_{korr} - E_{OC}$ im Kurzschluss gemessen. Dabei ist probenübergreifend eine Potentialauslenkung von 150 mV anodisch und 50 mV kathodisch gewählt worden, da exaktere Auslenkungen zum jeweiligen E_{korr} im Kurzschluss in Vorversuchen hierzu, aufgrund des in diesem Bereich relativ linearen Verlaufs der Strom-Potentialkurven, vergleichsweise nur noch wenig Änderung ergaben. Das Potential wurde nach Erreichen der Potentialauslenkung potentiostatisch für 900 s gehalten und anschließend der Polarisationswiderstand als Tangentensteigung der Strom-Potentialkurve um diese Potentialstufe analog **Abb. 24** in **Kapitel 4.4.5** bestimmt, vgl. **Abb. 50**. Der Polarisationswiderstand der Kathode wurde dabei aufgrund der dort inversen Steigung der Strom-Potentialkurve zum anodischen Ast im Betrag angesetzt. Zuletzt erfolgte die Ermittlung der Elektrolytwiderstände R_{el} zwischen Messanode und Messkathode.

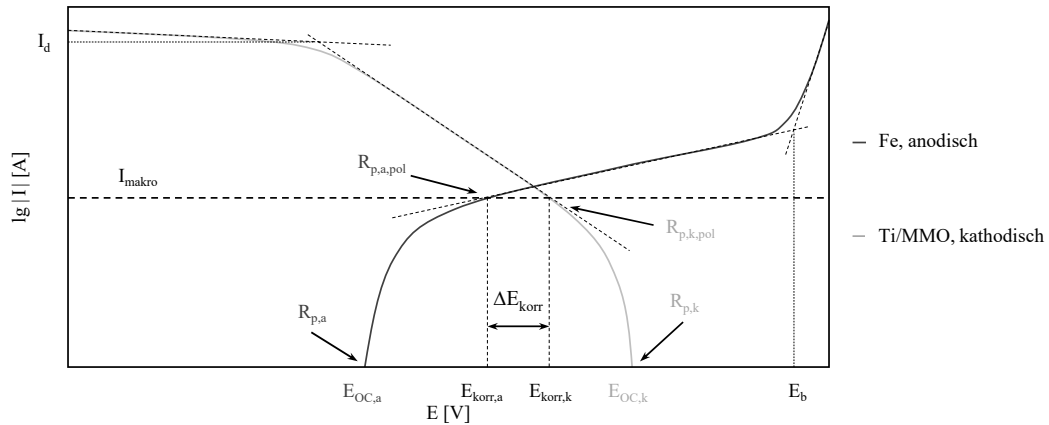


Abb. 50: Schematischer Vergleich der ermittelten Polarisationswiderstände mit Überlagerung der jeweiligen Strom-Potentialkurven der Messanoden und –kathoden in Anlehnung an [132, 153, 154]; I_d = (Sauerstoff)-Diffusionsgrenzstrom; R_p = Polarisationswiderstand als Tangentensteigung vs. E_{OC} ; $R_{p,pol}$ = Polarisationswiderstand als Tangentensteigung um ausgelenkte Potentialstufe; E_{kor} = Korrosionspotentiale; R_{el} = Elektrolytwiderstand; I_{makro} = Makroelementstrom; E_b = Durchbruchpotential – **Versuchsreihe B**

Die Ergebnisse der aus **Gleichung 13** ermittelten Einzelparameter in **Abb. 51** ergeben bei Verwendung der Polarisationswiderstände am ausgelenkten System eine deutlich bessere Übereinstimmung der errechneten I_{makro} mit den gemessenen I_{makro} , insbesondere bei trockeneren Lagerungsfeuchten.

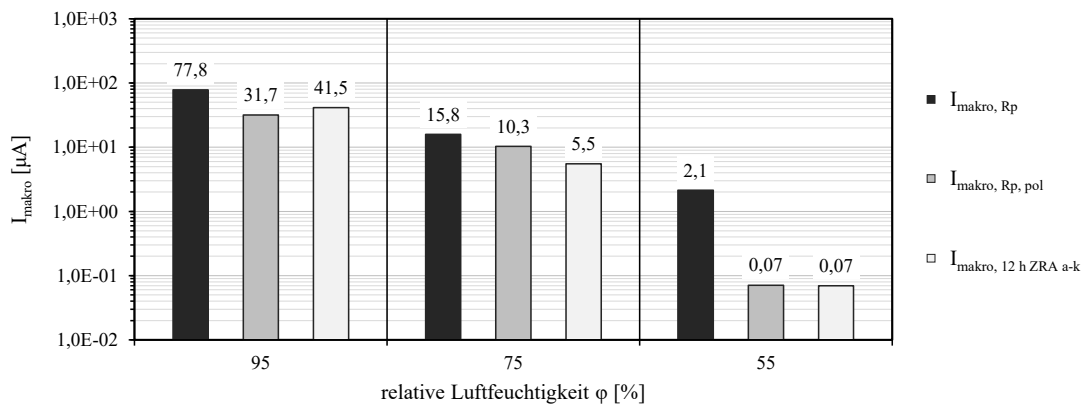


Abb. 51: Aus Systemwiderständen errechnete und durch ZRA-Messung ermittelte Makroelementströme an Zusatzproben aus Serie I/0,5/2,5 – **Versuchsreihe B**

Bei Betrachtung der R_p -Werte um ein vorab ausgelenktes Ausgangspotential in **Abb. 52** ist in jeder Feuchtestufe der Einfluss der R_p -Werte der Messanoden maßgebend. Prozentual werden die Anteile der Elektrolytwiderstände R_{el} und Polarisationswiderstände der Messkathoden $R_{p,k}$ mit abnehmender Feuchte deutlich geringer. Zu erwarten ist, dass deutlich längere Haltezeiten bei den ausgelenkten Polarisationswiderständen noch exaktere Werte liefern und sich zunehmend mit den Makroelementströmen nach Wartezeiten von mehreren Tagen decken sollten.

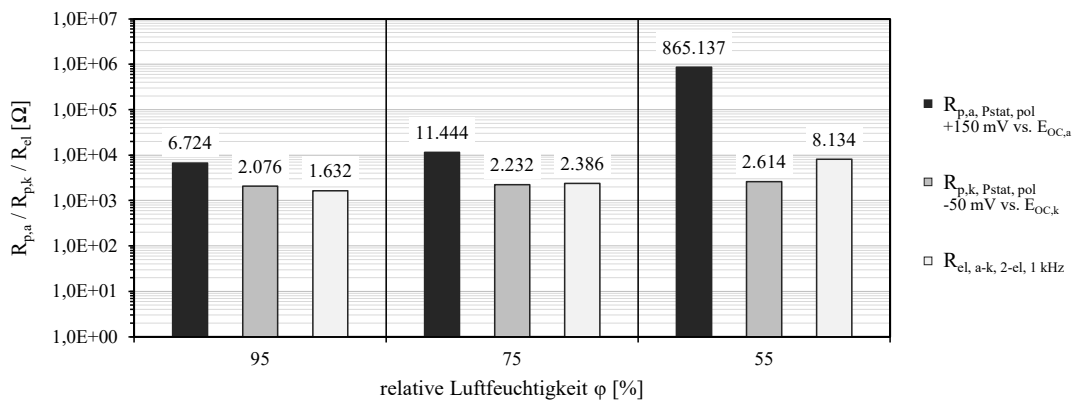


Abb. 52: Korrosionsrelevante Systemwiderstände an Zusatzproben aus Serie I/0,5/2,5; Polarisationswiderstände ± 10 mV um angegebene Polarisationsstufe ermittelt – **Versuchsreihe B**

Die Ergebnisse decken sich auch mit Untersuchungen aus *Hiemer* [7]. Dort wurden die Steuerungsparameter an Balken im Rissbereich vor und nach der Applikation einer Beschichtung untersucht. Der anodische Polarisationswiderstand wurde dort jedoch abweichend als Sekante zwischen freiem Korrosionspotential und einem anodischen, potentiostatischen Haltepunkt bestimmt. Durch die anodische Sekantensteigung sind realistischere Werte im Hinblick auf die Makroelementkorrosion zu erwarten als durch die Tangentensteigung am freien Korrosionspotential. Jedoch bildet die Sekante zwischen freiem Korrosionspotential und einem ausgelenkten anodischen Haltepunkt den Kurvenverlauf der Strom-Potential-Kurve ungenauer ab, als die Tangentensteigung am ausgelenkten System, vgl. **Abb. 50**.

5.4.4 STROM-POTENTIALKURVEN

Die nachfolgenden Strom-Potentialkurven sollen dem qualitativen Vergleich dienen, wie sich die zunehmende Trockenheit auf die Anodenkinetik auswirkt. Die Strom-Potentialkurven wurden an allen CEM I-Serien aus **Versuchsreihe B** erstellt, da dort die Ausgleichfeuchten weitgehend erreicht waren. Eine Darstellung der anodischen Strom-Potentialkurven ist, nach Feuchtegehalt getrennt, in **Anhang A, Abb. A.5 - 1 bis Abb. A.5 - 3** gegeben.

In nachfolgender **Abb. 53** sind die CEM I-Serien mit $w/z = 0,50$ gemeinsam dargestellt. Dabei ist der Einfluss einer abnehmenden Probenfeuchte auf das Korrosionsverhalten gut erkennbar. So führt ein geringerer Feuchtegehalt ebenso wie ein geringerer Chloridgehalt erwartungsgemäß zu geringeren Stromstärken bei gleicher Polarisation. Ausgehend von immer positiveren $E_{OC,a}$ -Werten sind die Kurvenverläufe durch die geringeren Ströme bei der IR-Korrektur auch weniger stark „gestaucht“.

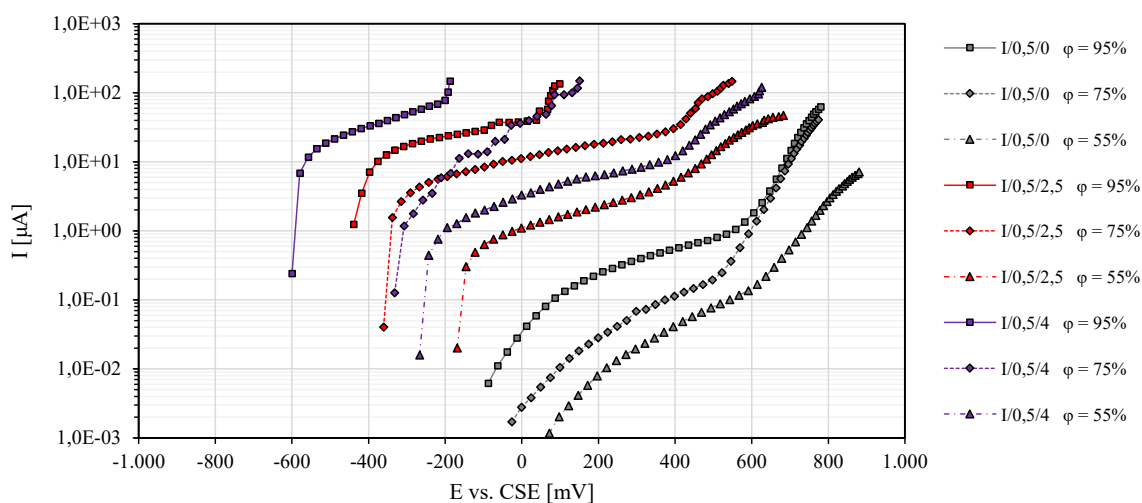


Abb. 53: Anodische Strom-Potentialkurven der Messanoden der CEM I-Serien mit $w/z = 0,50$ – **Versuchsreihe B**

In **Anhang A, Abb. A.5 - 1 bis Abb. A.5 - 3** erkennt man, dass bei trockeneren Bedingungen und niedrigen Chloridgehalten die Durchbruchpotentiale in einem Bereich von +400 mV bis +600 mV vs. CSE liegen. Im vorhandenen Durchbruch der chloridfreien Proben kann von einer Sauerstoffentwicklung bzw. bei den chloridhaltigen Proben und sehr positiven Potentialen kombiniert gegebenenfalls auch von einer Chlorgasentwicklung ausgegangen werden. Da die chloridhaltigen Proben bei Beginn der Messung bereits korrosionsaktiv waren,

ist das Durchbruchpotential nicht als Bereich für induzierte Lochkorrosion zu sehen. Vielmehr könnte nach *Pourbaix* [155] bei Annahme einer Ansäuerung des Lochgrunds von einer Entstehung von Fe^{3+} ausgegangen werden. Sehr gut erkennbar ist bei höheren Chlorid- und Feuchtegehalten die Verlagerung der Durchbruchpotentiale E_b in negative Potentialrichtung. Der Potentialunterschied von $E_{OC,a}$ zwischen Serie I/0,5/2,5 und Serie I/0,6/2,5 kann auf probenspezifische Streuungen zurückzuführen sein, wie die Schwankungen der $E_{OC,a}$ -Werte in **Abb. 41** aus **Kapitel 5.3.3** vermuten lassen. Insgesamt decken sich die Ergebnisse der Strom-Potentialkurven mit den beschriebenen Erkenntnissen in den vorangegangenen Kapiteln.

5.4.5 ERKENNTNISSE

Als maßgebender Steuerungsparameter für die Korrosionsprozesse zeichnet sich klar der Polarisationswiderstand der Messanode $R_{p,a}$ ab. Dieser konnte als Polarisationswiderstand um das Korrosionspotential E_{korrr} , das sich beim Kurzschluss Messanode und Messkathode einstellt, deutlich treffender beschrieben werden als bei der Messung um das freie Korrosionspotential E_{OC} . Der festgestellte höhere Polarisationswiderstand der Messanode bei niedrigeren Bauteilfeuchten kann beispielsweise durch einen geringeren anodisch wirksamen Flächenanteil und/oder Deckschichtbildungen bei den Korrosionsnarben zustande kommen. Auch die fehlende Feuchtigkeit an der Kontaktzone Stahl/Beton, die zu einer Diffusionshemmung führt, kann dafür ursächlich sein. Der höhere Elektrolytwiderstand durch die Trocknung spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Letztendlich bedingen sich jedoch die Parameter gegenseitig.

Die Strom-Potentialkurven zeigen, dass mit geringerem Chloridgehalt und niedrigerer Probenfeuchte auch die Stromstärke bei identischer Potentialdifferenz und damit der Ladungsumsatz deutlich sinkt. Hinzu kommt bei der Kinetik aus Messanode und Messkathode, dass bei zunehmender Trockenheit auch die Potentialdifferenzen $E_{korrr,k} - E_{korrr,a}$ zwischen Anode und Kathode kleiner werden. Der Bereich der „Durchbruchpotentiale“ E_b , wird hier bei den aktiven Proben eher als Fe^{3+} -Entstehungsbereich gesehen, der sich mit abnehmender Feuchte immer weiter in positivere Potentialrichtung verlagert.

5.5 GRAVIMETRISCHE MASSEVERLUSTE UND EIGENKORROSION

Nachfolgend werden die Ergebnisse der gravimetrisch und elektrochemisch ermittelten Masseverluste gezeigt und die daraus berechneten Eigenkorrosionsanteile und Eigenkorrosionsfaktoren gegenübergestellt. **Abb. 54** zeigt die gravimetrischen sowie elektrochemisch ermittelten Masseverluste für **Versuchsreihe B**, getrennt nach Serie und Lagerungsfeuchte. Die Verrechnung der dazugehörigen Eigenkorrosionsanteile und der Eigenkorrosionsfaktoren der Messanoden ist in **Abb. 55** dargestellt. Von den gravimetrischen Masseverlusten wurden die Blindprobenwerte bereits herausgerechnet. Die Proben der chloridfreien Referenzserien I/0,5/0 und III/0,5/0 werden bei den Ermittlungen der Eigenkorrosionsraten und Querschnittsverluste nicht aufgeführt, da dort erwartungsgemäß keine Korrosion aufgetreten ist.

Die berücksichtigte Probenanzahl ist in **Abb. 55** am Fußpunkt der Balken angegeben und bezieht sich auf alle angegebenen Masseverluste, Eigenkorrosionsanteile und topometrischen Daten. Aus den Betrachtungen wurden die Proben herausgenommen, die aufgrund zu geringer Korrosion vom Blindprobenwert nicht mehr differenzierbar waren oder beim Ausbau beschädigt wurden und dadurch eine Rückwägung nicht mehr möglich war.

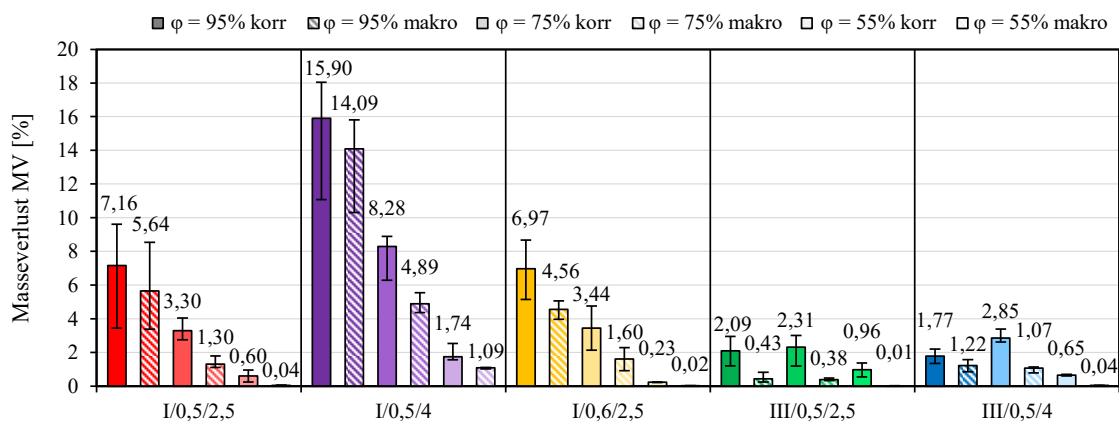


Abb. 54: Gegenüberstellung der korrosionsbedingten gravimetrischen Masseverluste (korr) der Messanoden mit den errechneten Masseverlusten aus I_{makro} (makro) nach Serie und Lagerungsfeuchte getrennt; Mediane, Min- und Max-Werte; Beschriftung der Mediane – **Versuchsreihe B**

Eine Betrachtung der Masseverluste in **Abb. 54** zeigt einen erwartungsgemäß deutlichen Einfluss der Probenfeuchte und des Chloridgehalts auf die Masseverluste. Hohe Proben-

feuchten und hohe Chloridgehalte führen demnach zu stärkerer Korrosion. Bei den CEM I-Serien ist dies deutlich erkennbar. Bei den CEM III/A-Serien ergibt sich der größte gravimetrische Masseverlust in der 75 % Lagerungsfeuchte. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Betonfeuchten der CEM III/A-Serien zwischen den einzelnen Lagerungsfeuchten nah beieinander liegen und deutlich von den Desorptionsfeuchtegehalten abweichen. Bei allen Serien ist eine zunehmende Abweichung zwischen den elektrochemisch ermittelten Masseverlusten zu den gravimetrisch ermittelten Masseverlusten auffällig, die in **Abb. 55** in einen entsprechenden Eigenkorrosionsanteil EK und einen Eigenkorrosionsfaktor f_{eigen} (Median) nach **Gleichung 25** aus **Kapitel 4.5** überführt wird.

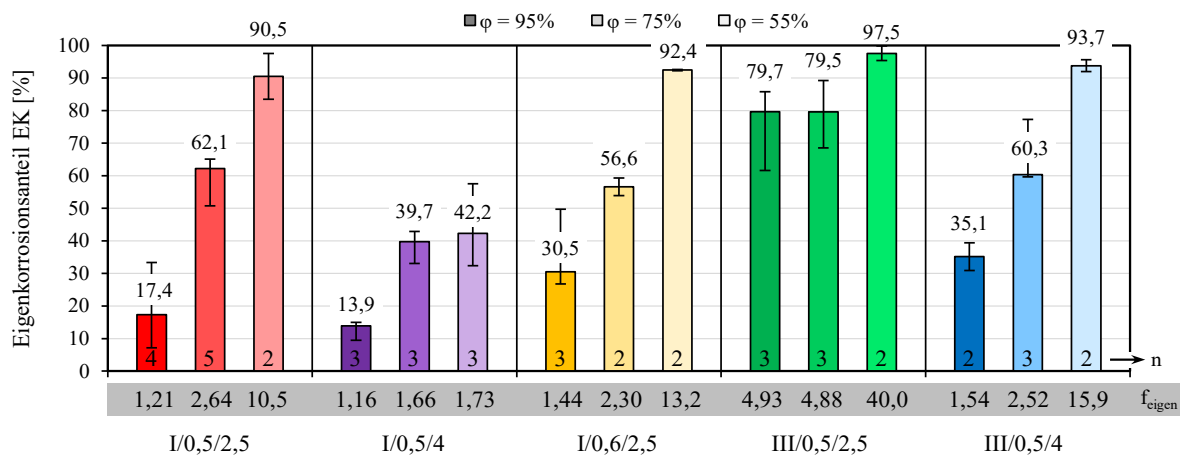


Abb. 55: Eigenkorrosionsanteile und Eigenkorrosionsfaktoren nach Serie und Lagerungsfeuchte getrennt; die Zahl am Fußpunkt jedes Balkens entspricht der berücksichtigten Probenanzahl; Mediane, Min- und Max-Werte; Beschriftung der Mediane – **Versuchsreihe B**

Wie in **Abb. 55** gut zu erkennen ist, ergibt sich serienübergreifend eine eindeutige Abhängigkeit von EK und f_{eigen} von der jeweiligen Lagerungs- und demnach Probenfeuchte. Ein abnehmender Feuchtegehalt erhöht die Eigenkorrosionsanteile. Höhere Chloridgehalte führen zu niedrigeren Eigenkorrosionsanteilen, gehen bei gleicher Lagerungsfeuchte allerdings auch mit höheren Ausgleichsfeuchten einher. Eine w/z-Werterhöhung von 0,50 auf 0,60 ergab bei den CEM I-Proben bei feuchter Lagerung eine leichte Zunahme der Eigenkorrosionsanteile. Eine Erhöhung der Eigenkorrosionsanteile mit höherem w/z-Wert deckt sich ebenfalls mit Ergebnissen aus Teilprojekt A1 in [79] sowie [13]. Das Verhalten kann mit den geringeren Ausgleichsfeuchten der Serie I/0,6/2,5 im Vergleich zu I/0,5/2,5 aus **Abb. 28** in **Kapitel 5.2.2** erklärt werden. Der deutlichste Unterschied zeichnet sich in der Zementart ab. Die CEM III/A-Proben weisen deutlich höhere Eigenkorrosionsanteile bei ansonsten gleichen Bedingungen wie die

CEM I-Proben auf. Zu berücksichtigen ist hier wie bei den Masseverlusten, dass die Ausgleichsfeuchten der beiden trockenen Lagerungsfeuchten bei den Untersuchungen noch nicht erreicht waren, weshalb bei Vorliegen der kompletten Ausgleichsfeuchten noch höhere Eigenkorrosionsanteile zu erwarten sind. Bei Serie III/0,5/2,5 konnte aufgrund der Eigenkorrosionsanteile über 60 % in allen Feuchtestufen eine sehr schlechte Korrelation zwischen elektrochemisch ermittelten und gravimetrisch ermittelten Masseverlusten erzielt werden. Ob sich hier aufgrund der höheren Druckfestigkeit, die in **Kapitel 3.2** erwähnt wurde, eine Anomalie ergeben hat oder die CEM III/A-Proben bei einem Chloridgehalt von 2,5 M.-%/z tatsächlich messtechnisch nicht nachvollzogen werden können, bleibt letztendlich nicht vollständig beantwortbar. Bei *Harnisch* [13] ergaben sich unter sonst identischen Bedingungen jedoch ebenfalls höhere Eigenkorrosionsanteile bei CEM III/A-Betonen im Vergleich zum CEM I-Pendant. Bei Untersuchungen aus Teilprojekt A2 in [79] ergaben sich bei CEM I-Proben Eigenkorrosionsanteile zwischen 4 % und 76 % (Mittelwert Referenzserie 58 %). CEM III/A-Proben lagen hier mit 33 % bis 95 % (Mittelwert Referenzserie 74 %) ebenfalls deutlich höher. Bei Chloridgehalten von 1,0 M.-%/z und Auslagerungsfeuchten von $\varphi = 50$ % ergaben sich an den CEM III/A-Proben Eigenkorrosionsanteile von 92 % bis 95 %, was sich mit den hier dargestellten Ergebnissen deckt. Dies deutet auf einen generell deutlich schlechter elektrochemisch erfassbaren Korrosionsabtrag bei CEM III/A-Proben hin, was mitunter auf die höheren Elektrolytwiderstände und das fein verästelte Porensystem zurückzuführen ist. Anzumerken ist, dass geringere korrosionsbedingte Masseverluste, die entsprechend mit höheren Eigenkorrosionsanteilen begleitet sind, auch eine steigende Messungenaugigkeit mit sich bringen.

Vergleicht man die gravimetrischen Masseverluste aus **Abb. 54** mit den Eigenkorrosionsanteilen aus **Abb. 55** fällt auf, dass mit der zunehmenden Trockenheit zwar die Eigenkorrosionsanteile deutlich steigen, die Masseverluste demgegenüber aber viel geringer ausfallen. Der direkte Vergleich der aus I_{makro} berechneten Masseverluste mit den gravimetrischen Masseverlusten in **Abb. 54** verdeutlicht dabei, wie stark sich die Eigenkorrosionsanteile auf die Abweichungen der gravimetrischen und elektrochemisch ermittelten Masseverluste bemerkbar machen. Für die gesamte Betrachtung der 55 % Lagerungsfeuchte muss man bei allen Serien mit Ausnahme von I/0,5/4 berücksichtigen, dass die festgestellten gravimetrischen Masseverluste sehr nahe am Blindprobenwert lagen und eine Streuung des Blindprobenwerts eine deutliche Werteänderung hervorrufen kann. Letztendlich können zu Versuchsende auch nur noch die Proben der Serie I/0,5/4 als eindeutig korrosionsaktiv zugeordnet werden, was die Abweichungen in der niedrigen Lagerungsfeuchte schnell relativiert.

Für die Validierung der Ergebnisse bietet sich ein Vergleich mit Literaturergebnissen an. Ein aussagekräftiger Vergleich lässt sich dabei mit *Harnisch* [13] ziehen. Der Probekörperaufbau bestand dort aus Platten ($l \cdot b \cdot h = 240 \cdot 180 \cdot 150 \text{ mm}^3$), in deren chloridfreien Unterbeton Messkathoden aus B500B-Stählen eingelegt wurden. In den chloridbelasteten Oberbeton ($h = 50 \text{ mm}$, 3,0 M.-%Cl/z) wurden Messanoden aus abgedrehten B500A-Stählen mit einer freien Länge von 50 mm und einer Betondeckung von 20 mm eingelegt. Die Proben wurden über ein oberseitiges Wasserbecken zyklisch, in der Regel einen Monat nass und trocken im Wechsel, mit Leitungswasser und teilweise zusätzlich mit Chloriden beaufschlagt. Die verwendeten Betonrezepturen sind dort sehr ähnlich. Trotz des abweichenden Versuchssetups sind die Ergebnisse bei [13] vergleichbar. Für einen Querschluss werden vier Serien herausgesucht, die am meisten Übereinstimmung untereinander aufweisen. Die Serien aus [13], die für einen Querverweis herangezogen werden, sind in **Tabelle 7** mit den wichtigsten Parametern dargestellt.

Tabelle 7: Übersicht der Serien aus *Harnisch* [13]

Serie	Zement	w/z-Wert	Bewässerungsdauer	zusätzliche Chloride
H ₂ O	CEM I	0,50	durchgehend	keine
REF	CEM I	0,50	jeden 2. Monat	3 % NaCl-Lösung; Nov. - März
W/Z	CEM I	0,60	jeden 2. Monat	3 % NaCl-Lösung; Nov. - März
CEM III	CEM III/A	0,50	jeden 2. Monat	3 % NaCl-Lösung; Nov. - März

Insgesamt ist bei den Serien von *Harnisch* [13], wie er selbst schreibt, von hohen Feuchtigkeiten und Chloridgehalten auszugehen. Chloridgehalte des Betons nach der gesamten Beaufschlagungsdauer mit chloridhaltigem Wasser wurden nicht angegeben. Insgesamt scheint jedoch ein Vergleich mit der 95 % Lagerungsfeuchte aus den Versuchen in dieser Arbeit am zielführendsten. Die Messanoden wurden in Abständen von 8, 12, 18 und 24 Monaten ausgebaut und deren Eigenkorrosionsanteile bestimmt. Ein eindeutiger zeitabhängiger Einfluss konnte dabei nicht festgestellt werden, weshalb nachfolgend die Mittelwerte aller Zeiträume für einen Vergleich herangezogen werden. Abweichend zu den Ergebnissen dieser Arbeit wurde bei [13] der Anteil an Spaltkorrosion topometrisch bestimmt und aus den Ergebnissen herausgerechnet. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in **Tabelle 8** gegeben. Ergänzend sind noch die Ergebnisse der 75 % Lagerungsfeuchte mit angegeben.

Tabelle 8: Vergleich der ermittelten Eigenkorrosionsanteile mit Serien aus *Harnisch* [13]

<i>Fraundorfer</i> Serie	Eigenkorrosionsanteil [%]			<i>Harnisch</i> Serie
	$\varphi = 95 \%$	$\varphi = 75 \%$	<i>Harnisch</i>	
I/0,5/2,5	17	62	16	H ₂ O
I/0,5/4	14	40	20	REF
I/0,6/2,5	31	57	32	W/Z
III/0,5/4	35	60	36	CEM III

Wie der Vergleich zeigt, sind die Ergebnisse aus den Serien mit *Harnisch* [13] mit der 95 % Lagerungsfeuchte sehr gut vergleichbar. Der Vergleich zeigt auch, dass trotz der dort herausgerechneten Spaltkorrosionsphänomene aus den Masseverlusten die Ergebnisse ähnlich sind. Die vorliegend vorhandenen Spaltkorrosionsphänomene waren bei insgesamt kleineren Masseverlusten auch geringer. Über eine optische Kategorisierung des Spaltkorrosionsanteils wurde versucht, diese in Relation zu den Eigenkorrosionsanteilen zu setzen, was aber zu keiner Korrelation führte. Daher ist davon auszugehen, dass die Spaltkorrosion, insbesondere im Bereich der Dichtgummis, zumindest teilweise erfasst wird. Eine Korrektur des Spaltkorrosionsanteils erscheint im vorliegenden Fall fragwürdig. Im Sinne der Praxisrelevanz ist dies auch nicht notwendig, da in den wenigsten Fällen beim Monitoring am Bauwerk die Möglichkeit der präzisen topometrischen Untersuchung bestehen wird.

5.6 TOPOMETRIE UND QUERSCHNITTSVERLUSTE

Für eine bessere Einordnung der ermittelten Masseverluste wurde eine topometrische Untersuchung der Messanoden nach dem Ausbau durchgeführt. Eine Gegenüberstellung der maximalen Schädigungstiefen X_{\max} und der Pittingfaktoren α_{pit} der Messanoden aus **Versuchsreihe B** ist in **Abb. 56** für den gesamten Untersuchungszeitraum (ohne Blindprobenkorrektur) dargestellt. Die dazugehörigen maximalen korrosionsbedingten Querschnittsverluste QV_{kor} , die im Kurzschlusszeitraum Messanode-Messkathode entstanden sind, können **Abb. 57** entnommen werden.

Betrachtet man die Schädigungstiefen in **Abb. 56** fällt auf, dass tendenziell mit abnehmender Lagerungsfeuchte auch die Schädigungstiefen geringer werden, wobei es in Einzelfällen

Abweichungen gibt. Insgesamt weisen die Schädigungstiefen hohe Streuungen auf. Die Schädigungstiefen weisen mit einem gesamten Maximum von rd. 1.200 μm etwas geringere Werte im Vergleich zu Ergebnissen von [13] an vergleichbaren Betonrezepturen bei feuchter Lagerung auf. Bei *Gonzalez et al.* [156] zeigten sich allerdings nach 6 Jahren Wechsellagerung trocken/nass nur maximale Pittingtiefen von 1.200 μm in gerissenen und 500 μm in ungerissenen Bereichen bei Betonproben mit 3 M.-% CaCl_2/z . Mit Medianwerten zwischen 2,5 und 14,1 liegen die Pittingfaktoren in Bereichen, die auch in Literaturergebnissen zu finden sind [13, 84, 85]. Ebenfalls erkennbar ist das in der Literatur analog zu findende Phänomen der höheren Pittingfaktoren bei kleinerer Gesamtschädigung, die sich auch hier bei trockeneren Lagerungsbedingungen zeigen. In der Gesamtbetrachtung weisen auch die Pittingfaktoren, ähnlich der maximalen Schädigungstiefen, deutliche Streuungen auf.

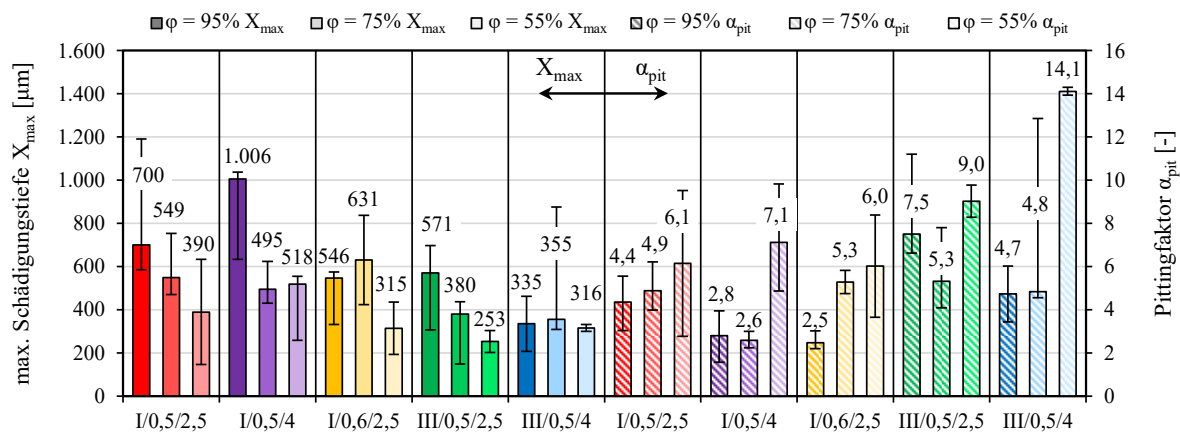


Abb. 56: Gegenüberstellung der max. Schädigungstiefen X_{\max} und Pittingfaktoren α_{pit} über den gesamten Versuchszeitraum nach Serie und Lagerungsfeuchte getrennt; Mediane, Min- und Max-Werte; Beschriftung der Mediane – **Versuchsreihe B**

Die korrosionsbedingten Querschnittsverluste QV_{kor} aus **Abb. 57** zeigen im Vergleich zu den Schädigungstiefen und Pittingfaktoren eine deutlich bessere Übereinstimmung zu den Masseverlusten MV_{kor} aus **Kapitel 5.5, Abb. 54**. Hier ist jedoch auch anzumerken, dass nach der Blindwertkorrektur nach 121 d Untersuchungszeit bei $\phi = 55\%$ an manchen Serien teilweise eine Unterscheidung des Blindprobenwertes nicht mehr möglich ist, was einerseits auf die Streuungen der Werte zurückgeführt werden kann, maßgeblich aber an den dort geringen entstandenen Schädigungen während des Kurzschlusszeitraums liegt. Ein Teil der Proben kann dabei bereits als nicht mehr korrosionsaktiv angesehen werden. Die gesamten Querschnittsverluste, die im Kurzschlusszeitraum entstanden sind, können insbesondere bei den zu $\phi = 95\%$

abweichenden Lagerungsfeuchten als gering bezeichnet werden. Anzumerken ist allerdings auch hier eine teilweise vorhandene Verzerrung durch die vernachlässigten Rippenanteile der Messanoden.

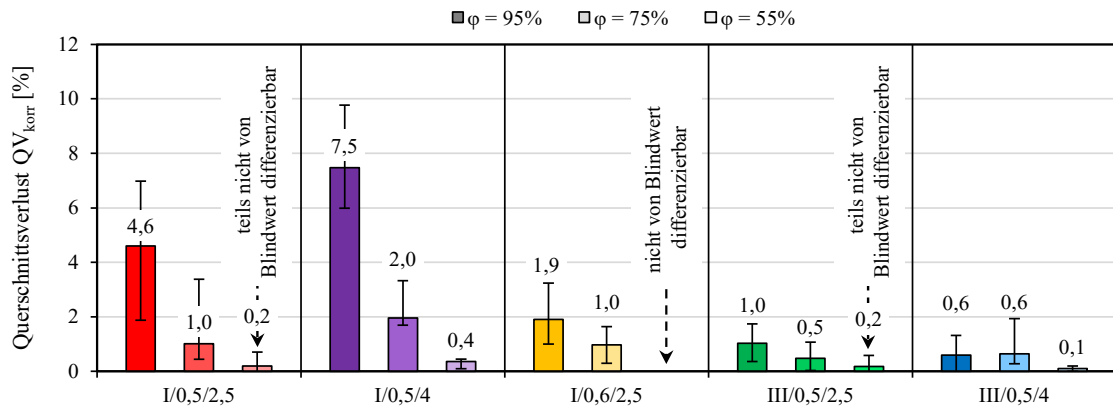
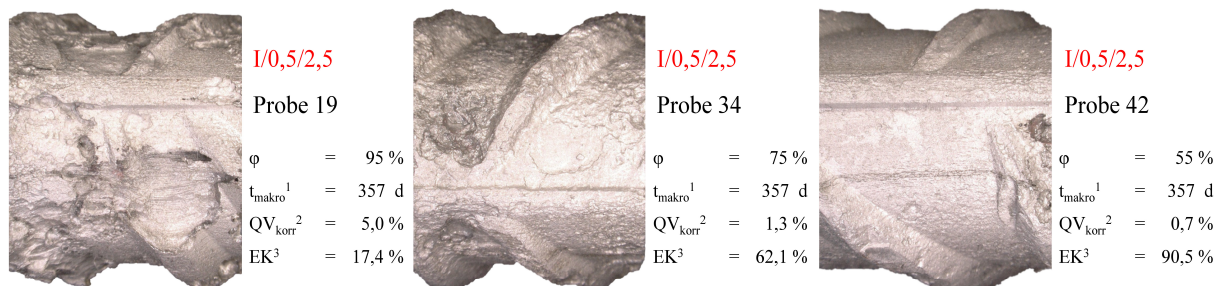


Abb. 57: Gegenüberstellung der korrosionsbedingten Querschnittsverluste QV_{korr} der Messanoden nach Serie und Lagerungsfeuchte getrennt; Mediane, Min- und Max-Werte; Beschriftung der Mediane – **Versuchsreihe B**

Um eine bessere Veranschaulichung der entstandenen Schädigungen sowie des Anteils der geschädigten Rippenfläche zu erhalten, sind in **Abb. 58** exemplarische Mikroskopiebilder von Messanoden aus Serie I/0,5/2,5 bei den drei betrachteten Feuchtestufen nach dem gesamten Untersuchungszeitraum gegenübergestellt.



¹ Kurzschlusszeitraum; ² korrosionsbedingter Querschnittsverlust; ³ Eigenkorrosionsanteil

Abb. 58: Exemplarische Übersicht über Schädigungen zum Laufzeitende nach relativer Luftfeuchte gestaffelt; Digitalmikroskopie; angegebener QV um Blindprobenwert korrigiert, Rippenanteil vernachlässigt – **Versuchsreihe B**

Bei Betrachtung von **Abb. 58** fällt auf, wie gering sich die Schädigungen bei $\varphi = 55\%$ an Probe 42 darstellen und auch wie hoch der Schädigungsgrad bei $\varphi = 95\%$ an Probe 19 optisch bei einem korrosionsbedingten Querschnittsverlust $QV_{\text{kor}} = 5,0\%$ wirkt, was teilweise an dem korrigierten Blindprobenwert liegt, maßgeblich aber aus den vernachlässigten Rippenanteilen resultiert.

5.7 ZUSAMMENHANG ERFASSTER EINFLUSSGRÖßEN AUF DIE EIGENKORROSION BEI TROCKNUNG

Um die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel in einen besseren Zusammenhang zu bringen, werden aus den ermittelten Eigenkorrosionsanteilen Korrelationen in Abhängigkeit der Einzelparameter gebildet. Dabei sind in den nachfolgenden Diagrammen aus den Eigenkorrosionsanteilen in **Abb. 55** aus **Kapitel 5.5** die Mediane je Serie und Feuchtestufe angegeben. Bei den zugehörigen Einzelparametern sind die Mediane der gemittelten Werte über den Kurzschlusszeitraum angesetzt worden. Alle Ergebnisse der CEM I-Betone wurden wie die Ergebnisse der CEM III/A-Betone in jeweils eine Grundgesamtheit überführt.

Abb. 59 zeigt die Korrelation aus den Eigenkorrosionsanteilen EK mit den Polarisationswiderständen der Messanoden $R_{p,a}$ (Vorschub: $0,10\text{ mV/s}$). Während die CEM III/A-Serien mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,88$ eine gute Übereinstimmung besitzen, ergibt sich bei den CEM I-Serien nur eine relativ schlechte Übereinstimmung von $R^2 = 0,56$. Wie im Diagramm dargestellt ist, ergibt sich die schlechte Korrelation maßgeblich durch den verhältnismäßig hohen $R_{p,a}$ aus Serie I/0,5/4 bei $\varphi = 55\%$. Ohne diesen Anteil wäre die Korrelation mit $R^2 = 0,86$ deutlich besser. Kritisch zu hinterfragen ist bei dem vermeintlichen Ausreißer, warum die $R_{p,a}$ dort höher als bei den anderen CEM I-Serien gleicher Feuchte liegen, obwohl diese Proben nach deren Makroelementströmen I_{makro} aus **Anhang A, Abb. A.4 - 9** heraus am korrosionsaktivsten waren. Hier liegt die Vermutung nahe, dass es entweder aufgrund der insgesamt kleinen Polarisationswiderstände, der schnellen Vorschubgeschwindigkeit und der Ermittlung der $R_{p,a}$ -Werte vs. $E_{OC,a}$ zu einer Verzerrung der Ergebnisse kommt, oder aber vermehrte Korrosionsablagerungen als Deckschicht fungieren und dadurch den $R_{p,a}$ vergrößern. Eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit würde dabei, ebenso wie die Bestimmung der Polarisationswiderstände im ausgelenkten Zustand, zu einem deutlich flacheren Verlauf der Regressionskurven führen. **Abb. 59** sollte demnach insgesamt kritisch betrachtet werden, ist hier aber wegen

des dominierenden Einflusses der $R_{p,a}$ -Werte bei niedrigen Feuchtegehalten nach **Kapitel 5.4.3** mit aufgeführt.

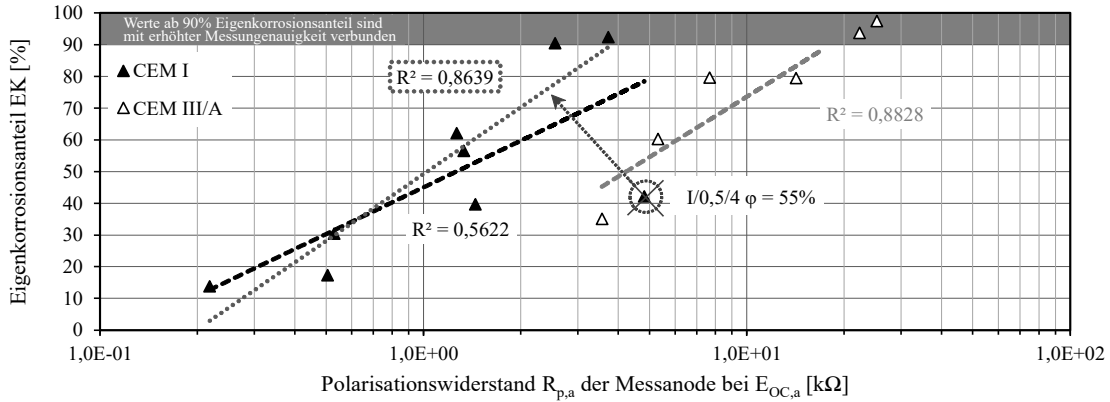


Abb. 59: Korrelation zwischen Eigenkorrosionsanteil und Polarisationswiderstand der Messanode; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtestufe; alle Serien in einer zementabhängigen Grundgesamtheit – **Versuchsreihe B**

In **Abb. 60** ist der Vergleich der EK mit den Elektrolytwiderständen R_{el} dargestellt. Die Regressionskurven passen hier mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 0,85$ für die CEM I-Serien und $R^2 = 0,81$ für die CEM III/A-Serien relativ gut. Da die Feuchteumverteilung, wie in **Kapitel 5.2.3** gezeigt, zum Ende der Messzeit immer noch nicht vollständig abgeschlossen war, wären hierdurch bei vollständigem Erreichen der Ausgleichsfeuchte auch etwas flachere Kurvenverläufe rückschließbar.

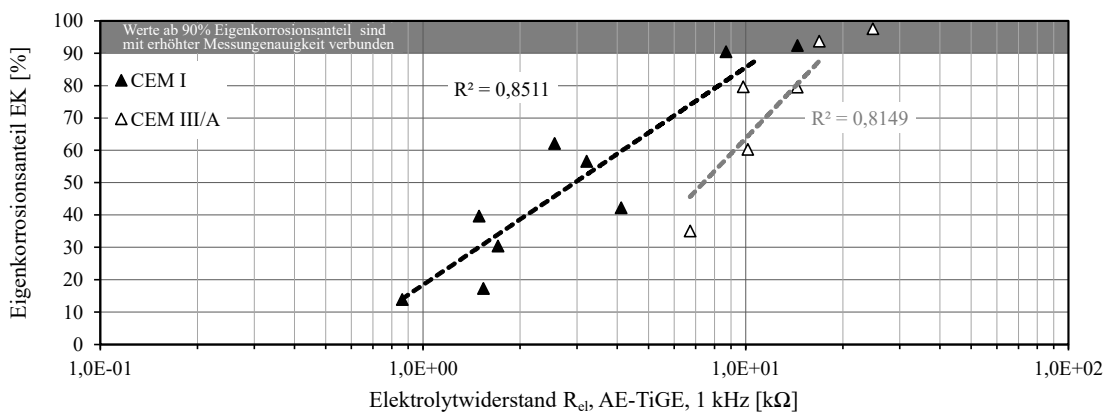


Abb. 60: Korrelation zwischen Eigenkorrosionsanteil und Elektrolytwiderstand von Messanoden zu Messkathoden; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtestufe; alle Serien in einer zementabhängigen Grundgesamtheit – **Versuchsreihe B**

Abb. 61 zeigt die Regressionsgeraden aus EK und der Treibspannung zwischen Messanoden und Messkathoden. Dieser Vergleich liefert die besten Bestimmtheitsmaße mit $R^2 = 0,95$ für die CEM I-Serien und $R^2 = 0,91$ für die CEM III/A-Serien. Diese Kenngröße stellt auch eine sehr einfach bestimmbare Messgröße am Bauwerk dar, die mit einem Multimeter abgreifbar ist und dementsprechend schon einen groben Anhaltswert für die zu erwartenden EK geben kann. Zu berücksichtigen ist allerdings zusätzlich die Abhängigkeit der Eigenkorrosion von der Messanordnung, weshalb die dargestellten Ergebnisse nur für das gezeigte Setup gültig sind.

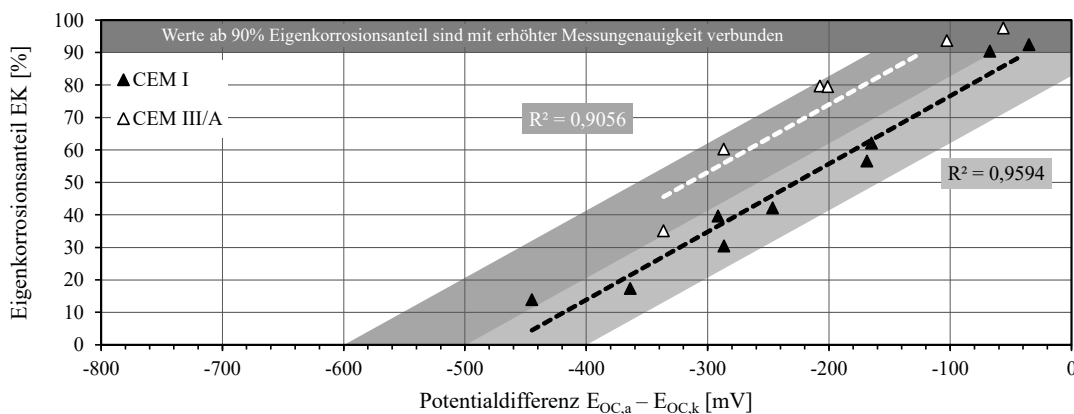


Abb. 61: Korrelation zwischen Eigenkorrosionsanteil und Treibspannung zwischen Messanoden und Messkathoden; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtestufe; alle Serien in einer zementabhängigen Grundgesamtheit – **Versuchsreihe B**

Die Überlagerung der EK und der korrosionsbedingten Masseverluste der Messanoden MV_{korr} mit den relativen Feuchtegehalten der Proben u_r ist für die CEM I-Serien in **Abb. 62** dargestellt. Die CEM III/A-Serien wurden aus dieser Betrachtung ausgelassen, da die Endfeuchtegehalte bei der künstlichen Trocknung nicht erreicht werden konnten. Die Regressionskurven von u_r liegen hierbei mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 0,85$ mit den MV_{korr} und $R^2 = 0,84$ mit den EK ebenfalls relativ gut. Beim Vergleich beider Regressionskurven lässt sich auch die geringere Relevanz eines hohen EK durch dabei auch kleinere MV_{korr} bei abnehmenden Feuchtegehalten erkennen. Bei einem relativen Feuchtegehalt von $u_r \geq 0,67$ ergibt sich nach dem untersuchten Zeitraum von einem Jahr ein korrosionsbedingter Masseverlust $MV_{\text{korr}} \geq 6\%$, der sich mit einem Eigenkorrosionsanteil $EK \leq 30\%$ (Eigenkorrosionsfaktor $f_{\text{eigen}} \leq 1,43$) an den CEM I-Serien gut erfassen lässt. Bei einem $EK = 50\%$ ($f_{\text{eigen}} = 2$) ergibt sich ein $MV_{\text{korr}} \approx 2\%$ bei $u_r \approx 0,52$. Höhere Eigenkorrosionsfaktoren ergaben sich demnach erst bei Masseverlusten kleiner als 2% .

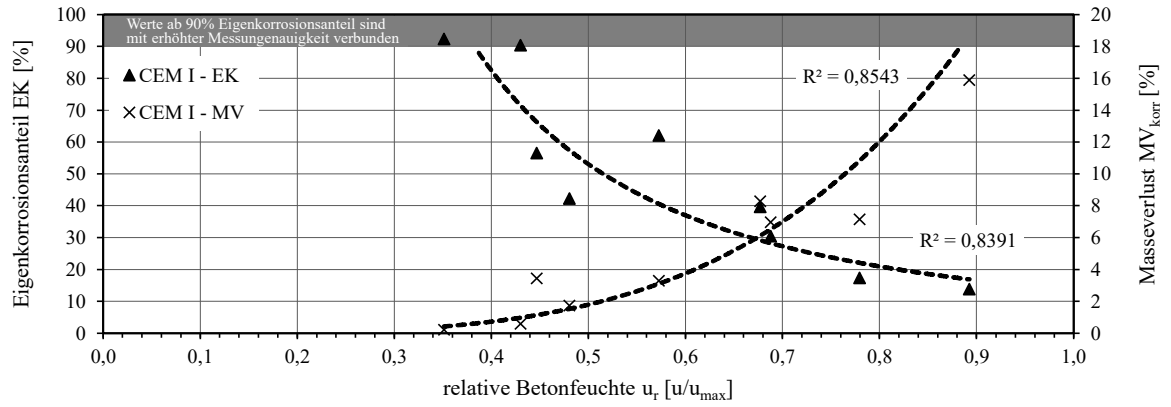


Abb. 62: Korrelation zwischen Eigenkorrosionsanteil und korrosionsbedingtem Masseverlust der Messanoden in Abhängigkeit des relativen Feuchtegehalts des Betons; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtestufe; eine Grundgesamtheit aller CEM I-Serien – **Versuchsreihe B**

6 AUSWIRKUNGEN FALSCH BERÜCKSICHTIGTER EIGENKORROSIONSANTEILE

6.1 ALLGEMEINES

Damit man einen besseren Eindruck bekommt, welche Auswirkungen falsch berücksichtigte Eigenkorrosionsanteile haben können, werden nachfolgend Beispielrechnungen durchgespielt. Die Berechnungen beziehen sich dabei nur auf die CEM I-Serien I/0,5/2,5 und I/0,5/4, da diese die größten Querschnittsverluste für eine Korrelation aufwiesen, gute Übereinstimmungen der Probenfeuchten mit den Ausgleichsfeuchten über den Untersuchungszeitraum hatten und noch am besten von den Blindwerten bei der trockensten Lagerungsfeuchte differenzierbar waren.

Die Berechnungen dienen primär dazu, die Auswirkungen verschieden gewichteter Eigenkorrosionsanteile aufzuzeigen. Die Ansätze des resultierenden Querschnittsverlusts über die Zeit sind tendenziell scharf angesetzt.

Die Berechnungen basieren auf folgenden, teils vereinfachenden Annahmen:

- Die Betrachtung bezieht sich auf ein Bestandsbauwerk mit nachträglicher Korrosionsmonitoringinstrumentierung während der Schädigungsphase. Die Messanoden sind bereits korrosionsaktiv.
- Die Berechnungen sind nur für die Abmessungen der verwendeten Messanoden gültig.
- Betrachtet wird immer die Trocknungszeit t_{trock} eines Stahlbetonbauteils auf Höhe der Bewehrung in Einzelstufen von $\varphi = 95\%$ über $\varphi = 75\%$ bis $\varphi = 55\%$. Vereinfachend findet die Trocknung nicht gleichmäßig statt, sondern das Bauteil verbleibt konstant in einer Feuchte, bis eine sprunghafte Trocknung auf die nächste Stufe erreicht wird.
- Annahme eines konstanten QV über die Zeit t je Feuchtestufe. Der zeitabhängige Querschnittsverlust $QV_{\text{korr}}(t)$ wird aus den korrosionsbedingten Masseverlusten MV_{korr} über den Kurzschlusszeitraum der **Versuchsreihe B** von 357 d mit der Regressionskurve berechnet, die in **Abb. 63** und **Anhang A, Abb. A.6 - 2** angegeben ist. Die zeitabhängigen, korrosionsbedingten Masseverluste $MV_{\text{korr}}(t)$ sind serienspezifisch aus den MV_{korr} aus **Abb. 54** nach 357 d errechnet worden.

- Eigenkorrosionsanteile bleiben über die Zeit konstant.
- Streuungen der Blindprobenwerte bleiben unberücksichtigt. Die festgestellten Masseverluste aus der Lagerungsfeuchte bei $\varphi = 55\%$ resultieren vollständig aus neu entstandenem Korrosionsabtrag während des Kurzschlusszeitraums von 357 d. Die Proben bleiben auch weiterhin gleichmäßig aktiv.
- Die Rippenanteile wurden bei den Querschnittsverlusten QV vernachlässigt, unter der vereinfachten Annahme, dass statisch nur der Kernquerschnitt des Bewehrungsstabs für die Lastübertragung mitwirkt.

Für die Berechnung wird immer ein Querschnittsverlust QV_{start} angesetzt, der zu Beginn an den Messanoden vorliegt, sowie ein angenommener Endwert $QV_{\text{max,TWP}}$, der einer theoretischen Beurteilung eines maximal tolerierbaren Querschnittsverlusts aus tragwerksplanerischen Gesichtspunkten dienen soll.

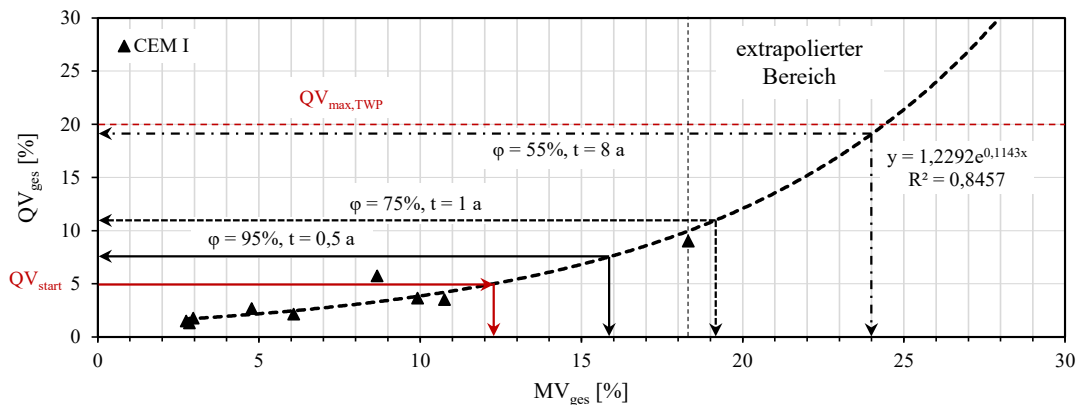


Abb. 63: Exponentielle Regression der gesamten Masse- und Querschnittsverluste der CEM I-Serien in einer Grundgesamtheit; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtestufe; Kennzeichnung der maßgebenden Einzelpunkte aus Berechnungsbeispiel 1 an Serie I/0,5/2,5 – **Versuchsreihe B**

Die Mediane der Eigenkorrosionsanteile EK aus **Abb. 55** in **Kapitel 5.5** der jeweiligen Serien und Feuchtegehalte wurden als Faktor f_{eigen} in nachfolgender **Gleichung 25** aus **Kapitel 4.5** angegeben, der mit I_{makro} multipliziert werden muss, damit sich I_{korr} ergibt.

$$I_{\text{korr}} = I_{\text{makro}} + I_{\text{eigen}} = I_{\text{makro}} \cdot f_{\text{eigen}} = \frac{I_{\text{makro}}}{(100 - EK)} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 25}$$

Dies entspricht nachfolgender Verrechnung der Masseverluste:

$$MV_{ges} = MV_{korr} + MV_{start} = MV_{makro} \cdot f_{eigen} + MV_{start} \quad \text{Gleichung 31}$$

MV_{ges}	prozentualer, gesamter (korrosionsbedingter) Masseverlust im Monitoringzeitraum	[%]
MV_{korr}	prozentualer, korrosionsbedingter Masseverlust im Monitoringzeitraum	[%]
MV_{start}	prozentualer Masseverlust der Messanode zu Monitoringbeginn	[%]
MV_{makro}	prozentualer, errechneter Masseverlust aus Makroelementstrom	[%]
f_{eigen}	Eigenkorrosionsfaktor	[-]

Die Bezugsmasse der Messanode für MV_{makro} kann über das rechnerische Volumen und die Dichte der Messanode unter Berücksichtigung von MV_{start} berechnet werden, vorliegend wurden aber die festgestellten Masseverluste nach 12 Monaten Untersuchungszeit im Kurzschluss als MV_{korr} angesetzt. MV_{start} ist in der Praxis an der Messanode nicht wägbare, weshalb davon ausgegangen wird, dass dieser über Bestimmungen des Querschnittsverlusts QV_{start} an repräsentativen Öffnungsstellen im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen abgeschätzt wird. Über die Regressionsgleichung aus **Abb. 63** kann dieser in MV_{start} überführt werden:

$$MV_{start} = \frac{\ln\left(\frac{QV_{start}}{1,2292}\right)}{0,1143} \quad \text{Gleichung 32}$$

MV_{start}	prozentualer Masseverlust der Messanode zu Monitoringbeginn	[%]
QV_{start}	prozentualer Querschnittsverlust der Messanode zu Monitoringbeginn	[%]

Die nachfolgenden Berechnungsbeispiele sind dabei immer im Bezug zu einem Referenzverlauf der Querschnittsverluste zu sehen, der den tatsächlichen Querschnittsverlusten mit Angabe der dazugehörigen Eigenkorrosionsfaktoren f_{eigen} entspricht.

6.2 BEISPIELRECHNUNG 1

Das erste Berechnungsbeispiel an Serie I/0,5/2,5 geht von einem ermittelten Querschnittsverlust an der Bewehrung von $QV_{\text{start}} = 5 \%$ und einem maximal zulässigen Querschnittsverlust $QV_{\text{max,TWP}} = 20 \%$ aus. Die Einzelwerte der angesetzten Trocknungszeiten t_{trock} mit den exemplarisch gewählten Eigenkorrosionsanteilen f_{eigen} sind in **Tabelle 9** dargestellt. Der zugehörige Kurvenverlauf ist in **Abb. 64** über die betrachtete Monitoringzeit t_m zu sehen.

Tabelle 9: Vergleich der Ergebnisse aus Beispielrechnung 1 – Serie I/0,5/2,5

I/0,5/2,5			Referenz			Ansatz 1			Ansatz 2		
ϕ	t_{trock}	EK	f_{eigen}	QV	MV	f_{eigen}	QV	MV	f_{eigen}	QV	MV
[%]	[a]	[%]	[-]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]
-	-	-	-	5,0	12,3	-	5,0	12,3	-	5,0	12,3
95	0,5	17,4	1,21	2,5	3,6	2	4,8	5,9	1	2,0	3,0
75	1	62,1	2,64	3,4	3,3	3	5,2	3,7	2	2,3	2,5
55	8	90,5	10,5	8,1	4,8	5	4,5	2,3	2	1,0	0,9
Σ	9,5	-	-	19,0	24,0	-	19,5	24,2	-	10,3	18,7

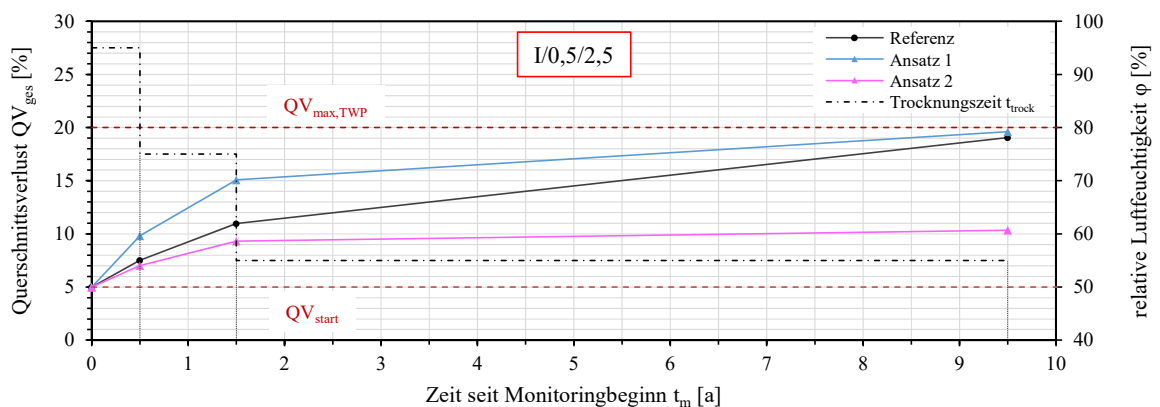


Abb. 64: Berechnungsbeispiel an Serie I/0,5/2,5; Verlauf der errechneten Querschnittsverluste aus Ansatz 1 und Ansatz 2 zum Referenzwert – **Versuchsreihe B**

Wird f_{eigen} am Anfang bei hoher Feuchte auch nur wenig überschätzt, liegen die prognostizierten QV sehr schnell über den tatsächlichen Werten (Ansatz 1). Eine falsche Wahl von f_{eigen} bei trockener Lagerung wirkt sich nur über mehrere Jahre aus. Wird dieser allerdings stark unterschätzt, kann sich durch die lange Laufzeit dennoch ein deutlicher Fehler bemerkbar machen, wonach der Querschnittsverlust auf der unsicheren Seite beurteilt wird (Ansatz 2).

6.3 BEISPIELRECHNUNG 2

Das zweite Berechnungsbeispiel an Serie I/0,5/4 geht von einem ermittelten Querschnittsverlust an der Bewehrung von $QV_{\text{start}} = 3 \%$ (beginnende Korrosion) und einem maximal zulässigen Querschnittsverlust $QV_{\text{max,TWP}} = 30 \%$ aus. Die Einzelwerte der Berechnung sind in **Tabelle 10** ersichtlich. Der entsprechende Kurvenverlauf ist in **Abb. 65** über die betrachtete Monitoringzeit t_m dargestellt.

Tabelle 10: Vergleich der Ergebnisse aus Beispielrechnung 2 – Serie I/0,5/4

φ [%]	I/0,5/4		Referenz			Ansatz 1			Ansatz 2		
	t_{trock} [a]	EK [%]	f_{eigen} [-]	QV [%]	MV [%]	f_{eigen} [-]	QV [%]	MV [%]	f_{eigen} [-]	QV [%]	MV [%]
-	-	-	-	3,0	7,8	-	3,0	7,8	-	3,0	7,8
95	0,5	13,9	1,16	4,4	8,0	1	3,6	6,9	1	3,6	6,9
75	1	39,7	1,66	11,8	8,2	2	14,0	10,0	1	5,0	5,0
55	2	42,2	1,73	9,3	3,5	3	20,3	6,0	2	6,8	4,0
Σ	3,5	-	-	28,5	27,5	-	40,9	30,7	-	18,4	23,7

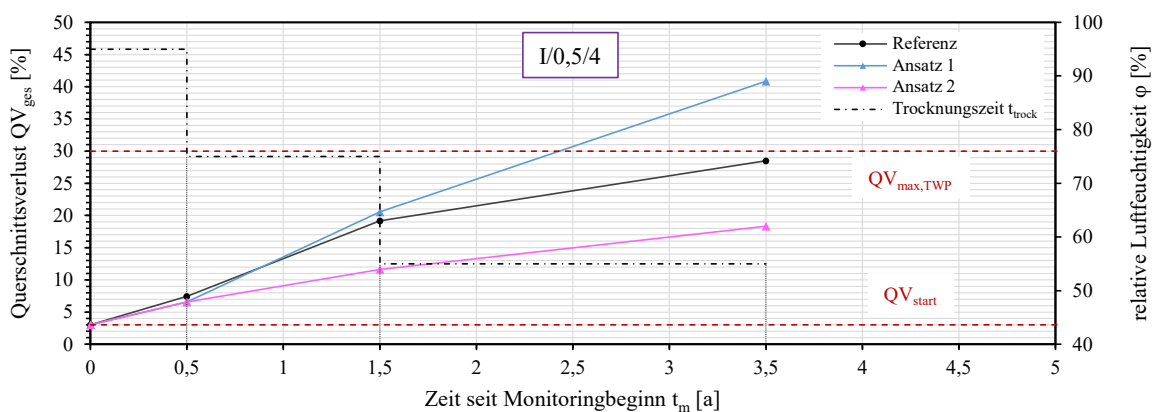


Abb. 65: Berechnungsbeispiel an Serie I/0,5/4; Verlauf der errechneten Querschnittsverluste aus Ansatz 1 und Ansatz 2 zum Referenzwert – **Versuchsreihe B**

Aufgrund des deutlich schnelleren Schädigungsfortschritts im Vergleich zur Beispielrechnung 1 muss hier f_{eigen} möglichst exakt gewählt werden. Durch die relativ hohen Korrosionsraten auch bei Trockenheit ist dort nur wenig Abweichung von f_{eigen} tolerierbar (Ansatz 1). Anfänglich auch nur gering abweichende Festlegungen von f_{eigen} führen nach kurzer Laufzeit zu stark abweichenden, prognostizierten Querschnittsverlusten (Ansatz 2).

6.4 DISKUSSION DER BEISPIELRECHNUNGEN

Bei den Beispielrechnungen handelt es sich um teils sehr idealisierte Annahmen, die jedoch die Problematik gut aufzeigen, weshalb der Eigenkorrosionsanteil, insbesondere auch bei verändernden Feuchtezuständen, berücksichtigt werden muss.

Die Berechnungen sind mit Ausnahme des unberücksichtigten Anteils der Rippung am Stahl als tendenziell streng für die Beurteilung des Querschnittsverlusts anzusehen. Das liegt primär daran, dass eine dauerhaft gleichbleibende Korrosion in jeder Feuchtestufe angesetzt wird, die über die Zeit in der Regel, durch beispielsweise Deckschichtbildungen, geringer wird und auch zum Erliegen der Korrosion führen kann. Durch die anfänglich hohen Masseverluste im Vergleich zu den prozentual geringeren Querschnittsverlusten darf man sich jedoch nicht täuschen lassen. Bei der Regressionsfunktion aus **Abb. 63** ergibt sich durch den exponentiellen Verlauf ein Querschnittsverlust von 100 % bei unter 40 % Masseverlust an der Messanode. Eine genauere Verrechnung des Trocknungsverlaufs über kontinuierliche Anpassungen würde in den Beispielbetrachtungen keine realistischeren Werte liefern, da der Trocknungsprozess von zu vielen Parametern am Bauwerk beeinflusst ist.

Die Masseverluste werden mit abnehmender Bauteilfeuchte kleiner. Kritisch für die Beurteilung im Hinblick auf Monitoring bei austrocknenden Bauteilen ist dabei allerdings der Querschnittsverlust der zuvor bei höheren Feuchten eintritt und dementsprechend die Querschnittsverluste später bei geringeren Masseverlusten exponentiell in die Höhe schnellen lässt. Hinzu kommt die Verweilzeit des Bauwerks bei trockenen Bedingungen. Diese ist, sofern man einen Instandsetzungserfolg durch Abtrocknen der Bauteile erwartet, in der Endfeuchte idealerweise sehr lang. Dadurch können sich in Summe auch Anteile des Querschnittsverlusts ergeben, die langfristig ohne Berücksichtigung einen deutlichen Fehler in der Bewertung nach sich ziehen. Während in der gewählten Konstellation bei Beispiel 1 das Monitoring für eine Begleitung der Restnutzungsdauer oder die Überwachung bis zu einer anderweitigen Instandsetzungsmaßnahme noch sinnvoll ist, wäre in Beispiel 2 aufgrund der hohen Chloridgehalte ein Monitoring sinnfrei. Der Schädigungsfortschritt ist hier zu schnell, zumal das Beispiel auch davon ausgeht, dass die Installation der Sensorik bereits zeitnah zu einem Zeitpunkt unmittelbar nach der Depassivierung stattfand.

Ein zu berücksichtigender Einfluss ist die Messung kleiner Makroelementströme am Bauwerk selbst. In den wenigsten Fällen wird bei einer automatisierten Aufzeichnung die Verwendung von reinen ZRA-Messknoten in potentiostatischer Arbeitsweise und korrekter Auflösung in den nA-Bereich vorhanden sein. Selbst bei der Möglichkeit der Messung bleiben die hieraus generierten Daten fragwürdig, da mit größeren Kabelstrecken und abhängig von Störfeldern in der Umgebung der gemessene Makroelementstrom vermutlich nur noch vage als Abbild der Korrosionsprozesse gesehen werden kann. Hier ist eher zu überlegen, ob bei Trockenheit kleine Makroelementströme unter einer Messgrenze, die aufgrund des Setups gewählt werden sollte, mit einem pauschalen Mindestwert angesetzt werden sollen. Sobald sich hieraus, auf der sicheren Seite liegend, Endzeitpunkte der Nutzungsdauer absehen lassen, könnte man die Messdaten an diversen Sensorstellen durch Ausbau der Messanoden verifizieren. Anhand dieser Ergebnisse würden sich dann die weiteren Messstellen mit einer besseren Prognose abbilden lassen.

7 ÜBERTRAGUNG DER ERGEBNISSE AUF MONITORING AM BAUWERK

7.1 ALLGEMEINES

Für die nachfolgenden Kapitel werden Ergebnisse des Teilprojekts der Hochschule München aus dem Forschungsvorhaben „KoMICS“ mit eingepflegt, von dem erste Ergebnisse bereits in [157] veröffentlicht wurden. Die dabei durchgeführten Versuche werden nachfolgend zum besseren Verständnis kurz erläutert.

Bei dem Forschungsprojekt „KoMICS“ wurden Messanoden aus Betonstahl B500B ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 50 \text{ mm}$) in Betonproben ($l \cdot b \cdot h = 30 \cdot 30 \cdot 15 \text{ cm}^3$) mit einer Betonüberdeckung von 25 mm eingebettet. Die oberen 6 cm der Proben, in denen sich die Messanoden befanden, wurden mit chloridhaltigem Beton (4 M.-%/z) hergestellt. Die Messkathoden aus Betonstahl B500B, mit denen die Messanoden im Kurzschluss standen, befanden sich im unteren, chloridfreien Plattenbereich. Die Proben wurden einem Trocknungszyklus über rd. ein Jahr und einem Rückbefeuchtungszyklus über mehrere Monate unterzogen. Während dieser Zeit wurden unter anderem der Makroelementstrom und die Korrosionspotentiale aufgezeichnet. An den Messanoden wurden nach Versuchsende die Eigenkorrosionsanteile bestimmt. Die zugehörigen Datenpunkte in **Abb. 66** des nachfolgenden Kapitels bilden die Mittelwerte aus jeweils drei Messanoden eines CEM I-Betons und eines CEM III/A-Betons mit jeweils $w/z = 0,55$. Die Zementchargen des Forschungsprojekts und dieser Arbeit sind identisch.

7.2 ABHÄNGIGKEIT DES EIGENKORROSIONSANTEILS VON DER MAKROELEMENTSTROMDICHTEN

Wie aus den Arbeiten von *Beck* [12], *Harnisch* [13], *Heft 601* des DAfStb [79] und *Schiegg* [14] hervorgeht, ist der Eigenkorrosionsanteil von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst. Darunter fällt auch die Geometrie und Elektrodenausführung im Messsetup, weshalb alle dort gezeigten Ergebnisse, ebenso wie die hier vorgestellten, nur für die untersuchten Randbedingungen gelten. Trotz der abweichenden Versuchsanordnung zeigen die meisten hier dargestellten Ergebnisse und die Ergebnisse aus der Literatur bei ähnlichen Feuchtegehalten und Betonrezepturen vergleichbare Tendenzen.

Anhaltswerte für den Einfluss verschiedener variiertes Parameter auf den Eigenkorrosionsanteil wären aus einer Parameterstudie über eine Modellierung ableitbar. Qualitative Einflüsse, die den Eigenkorrosionsanteil erhöhen, werden bereits in den oben genannten Literaturstellen beschrieben und können auch aus **Kapitel 5.7** abgeleitet werden. Prinzipiell erhöhen alle Systemparameter, die einen Ladungsübergang von Messanode zur Messkathode erschweren, die Eigenkorrosion. Die größte Schwierigkeit beim Korrosionsmonitoring ist jedoch die Adaption des Eigenkorrosionsanteils auf den jeweils untersuchten Fall, zumal am Bauwerk im Vergleich zum Labor weniger Möglichkeiten für eine genaue Analyse existieren. Anwendungstechnisch hilfreich wäre die Abschätzung des zu erwartenden Eigenkorrosionsanteils über einen einfach bestimmbaren Parameter. Da die in **Kapitel 5.7** beschriebenen Zusammenhänge alle eine Abhängigkeit vom Versuchsssetup aufweisen, sind diese nicht direkt auf andere Fälle übertragbar.

Für die weitere Betrachtung fällt der Fokus erneut auf **Gleichung 13** aus **Kapitel 2.1.5**, die sich aus dem Ohmschen Gesetz nach **Gleichung 11** ergibt. Jegliche Änderung im Korrosionssystem, sowohl die Änderung von Polarisations- wie auch Elektrolytwiderstand und die Veränderung der Potentialdifferenz $E_{OC,a}$ zu $E_{OC,k}$, mündet in einer Veränderung des Makroelementstroms, der letztendlich standardmäßig beim Monitoring gemessen wird. Aus diesem Grund wird nachfolgend die Korrelation zwischen dem gemessenen Makroelementstrom I_{makro} und dem Eigenkorrosionsanteil EK in **Abb. 66** dargestellt.

Um eine Interpretation des Eigenkorrosionsanteils auch abseits des hier untersuchten Versuchsssetups zu erhalten, wurden die Literaturergebnisse aus *Harnisch* [13], Teilprojekt A1 aus

Heft 601 [79] sowie des Teilprojekts der Hochschule München aus dem Forschungsprojekt „KoMICS“ (EK noch unveröffentlicht) mit eingepflegt. Wie bereits eingangs in **Kapitel 2.1.6** für die ersten beiden Quellen beschrieben, wurden dort abweichende Prüfkörper- und Elektrodenaufbauten sowie andere Untersuchungsschemata geprüft. **Abb. 66** zeigt das Ergebnis einer Grundgesamtheit aller betrachteten Untersuchungen. Die Makroelementströme i_{makro} wurden dabei alle auf eine Makroelementstromdichte i_{makro} verrechnet, um die verschiedenen Messanodengeometrien miteinander vergleichen zu können. Die angegebene Regressionsfunktion bezieht sich dabei auf eine Makroelementstromdichte i_{makro} , für die näherungsweise die gesamte Mantelfläche der Messanode angesetzt wurde. Für eine einheitliche Beurteilung wurden zudem die Mittelwerte aus den hier dargestellten Untersuchungen angegeben, wobei die Abweichungen zu den Medianwerten aus den vorangegangenen Kapiteln gering sind.

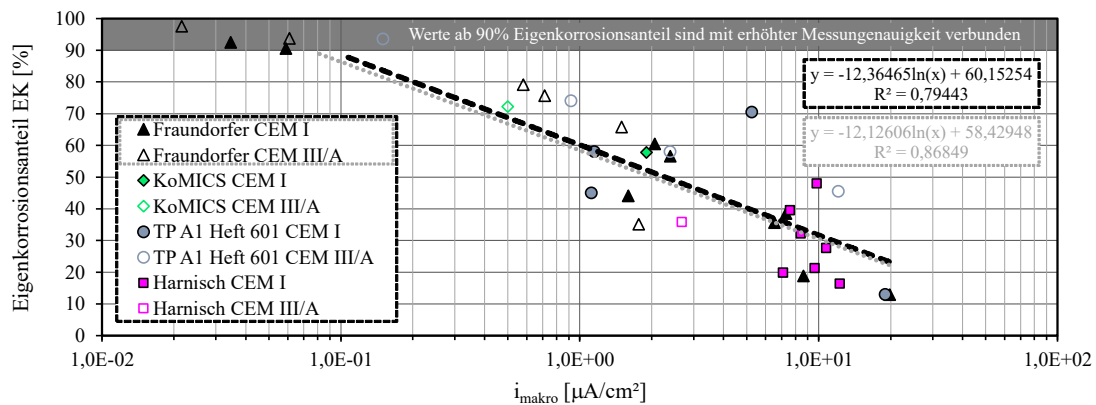


Abb. 66: Korrelation zwischen Eigenkorrosionsanteil EK und Makroelementstromdichte i_{makro} ; ein Messpunkt entspricht dem Mittelwert einer Serie; **schwarze Trendlinie:** eine Grundgesamtheit aller Serien aus den hier dargestellten Untersuchungen sowie den Ergebnissen aus *Harnisch* [13], Teilprojekt A1 aus *Heft 601* [79] und dem Teilprojekt der Hochschule München des Forschungsvorhabens „KoMICS“; **graue Trendlinie:** nur die Ergebnisse aus den hier dargestellten Untersuchungen

Erkennbar ist in **Abb. 66**, dass die Regressionskurve der eigenen Untersuchungen (**graue Trendlinie**) die Werte mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,87$ relativ gut abbildet. Eine Trennung der Daten nach Zementart würde nochmals bessere Übereinstimmungen liefern, ist jedoch für den Praxisfall weniger maßgebend, da die verwendete Zementart oft nicht bekannt ist. Ebenfalls sieht man, dass die Regressionskurve aller Ergebnisse (**schwarze Trendlinie**) fast deckungsgleich mit der aus den eigenen Untersuchungen verläuft.

Die Einbeziehung der Literaturergebnisse liefert zwar eine erwartungsgemäß stärkere Streuung als bei gesonderter Betrachtung der hier untersuchten Serien. Dennoch ermöglicht die gemeinsame Auswertung eine praxisnahe Abschätzung des Eigenkorrosionsanteils und ist aufgrund der Vielzahl an abgedeckten Randbedingungen näherungsweise auch auf Bauwerksuntersuchungen übertragbar. Zudem liegt die Regressionskurve aller Werte nahezu deckungsgleich mit der Regressionskurve der hier vorgestellten Untersuchungen, vgl. **Abb. 66**. Dies spricht für die untersuchungsübergreifende Korrelation zwischen EK und i_{makro} , da die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bereits ein breites Spektrum von i_{makro} liefern.

Folgende Parameter sind über die Datenpunkte abgedeckt:

- CEM I- und CEM III/A-Zemente unterschiedlicher Werke und Festigkeitsklassen.
- Chloridgehalte von 1,0 M.-%/z bis mindestens 4,0 M.-%/z mit Direktzugabe im Anmachwasser, sowohl über NaCl als auch über eine Mischung aus 10 % CaCl₂ und 90 % NaCl.
- w/z-Werte zwischen 0,50 und 0,70.
- Messanodenlängen zwischen 10 mm und 100 mm als abgedrehte, blanke Stahlbolzen sowie gerippte Bewehrungsstähle mit Walzhaut; Güte: B500A und B500B.
- Unterschiedliche Kontaktierungen der Messanoden.
- Proben mit und ohne Spaltkorrosion; auch Proben, bei denen Spaltkorrosion aus den Masseverlusten herausgerechnet wurde.
- Messkathoden aus Bewehrungsstahl in chloridfreiem Beton und Messkathoden aus Ti/MMO-Bändern in chloridhaltigem Beton.
- Unterschiedliche Anoden-/Kathodenverhältnisse.
- Unterschiedliche Probekörpergeometrien.
- Lagerungsfeuchten von $\varphi = 50 \%$ bis über $\varphi = 95 \%$ nahe an der Wassersättigungsgrenze.
- Lagerungstemperaturen von $\vartheta = 20 \text{ °C}$ und $\vartheta = 30 \text{ °C}$.
- Untersuchungszeiträume bis 24 Monate mit unterschiedlichen Ausbaupunkten.
- Abweichende Untersuchungsbedingungen (Messgeräte, Messintervalle, Personal, Vorgehen, Beizarten).

Wie unschwer zu erkennen ist, ergibt sich eine immense Anzahl an Einflussgrößen zwischen den Untersuchungen. Vergleicht man die Streuungen der einzelnen Datenpunkte um die Regressionskurve aller Untersuchungen aus **Abb. 66** fällt auf, dass diese innerhalb der üblichen Streuungen bei Versuchen zur Eigenkorrosion liegen, die auch an identischen Serien auftreten kann. Betrachtet man beispielsweise den Bereich von $i_{\text{makro}} \approx 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, erhält man aus der Regressionsfunktion bei den CEM I-Proben einen $\text{EK} \approx 32 \%$ mit einer Streuung $< \pm 20 \%$. Dieser Bereich liegt in einer Größenordnung, in dem auch Eigenkorrosionsanteile bei ansonsten identischen Randbedingungen liegen können. Zu beachten ist jedoch, dass es sich dabei um Streuungen der Mittelwerte und nicht der Einzelwerte handelt.

Um die Ergebnisse hinsichtlich der Streuungen besser abzusichern, wurde eine statistische Auswertung mit der Software StatRel (Version 3.14) durchgeführt. Dabei wurde das 90 %-Prognose- und Konfidenzintervall berechnet. Die Ergebnisse sind in **Abb. 67** dargestellt. Das angegebene Prognoseintervall liefert eine Wahrscheinlichkeit von 90 %, dass ein zukünftiger (Einzel-)Wert in den angegebenen Intervallgrenzen liegt. Das dargestellte Konfidenzintervall deckt hingegen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % den Bereich ab, in dem sich der tatsächliche Mittelwert befindet. Folglich liegen die Intervallgrenzen des Prognoseintervalls (Intervallschätzung des Einzelwerts) deutlich weiter auseinander als die des Konfidenzintervalls (Intervallschätzung des Mittelwerts), siehe auch [158]. Wichtig für die Gesamtbeurteilung der Werte ist, dass es sich bei den angegebenen einzelnen Messwerten selbst um serienspezifische Mittelwerte handelt. Die angegebenen Intervallgrenzen sind ihrerseits Regressionsfunktionen, von denen die tatsächlich berechneten Intervalle (dargestellt als Punkte) minimal abweichen können. Speziell die Grenzen des Konfidenzintervalls ergeben in der halblogarithmischen Darstellung aus **Abb. 67** einen leicht gekrümmten, hyperbolischen Verlauf.

Für eine Ergebnisinterpretation auf der sicheren Seite sind nur die Bereiche über der Regressionskurve der Messdaten (**schwarze Trendlinie**) in **Abb. 67** relevant. Daher sind auch nur die Formeln und Bestimmtheitsmaße für die oberen Intervallgrenzen angegeben. Die Beschreibung der Intervallgrenzen über Trendlinien wurde gewählt, um eine einfache Implementierung der Ergebnisse in Tabellenkalkulationsprogramme zu ermöglichen.

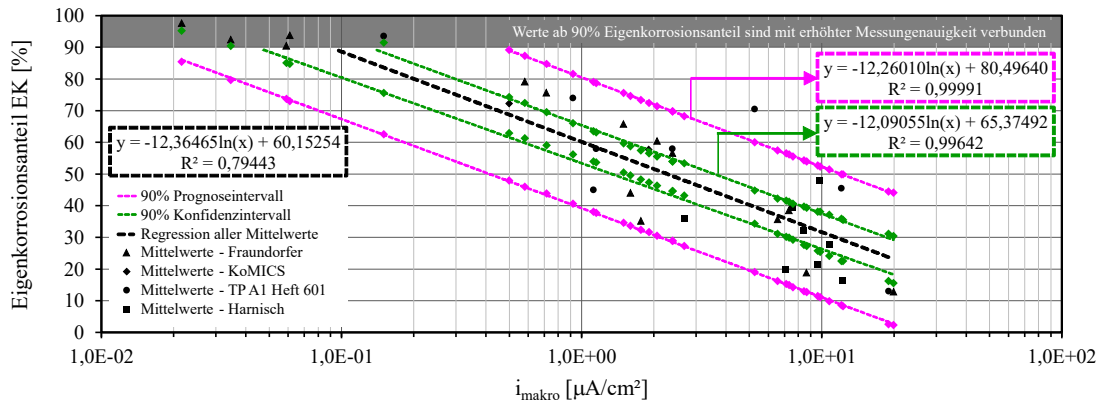


Abb. 67: Korrelation zwischen Eigenkorrosionsanteil EK und Makroelementstromdichte i_{makro} aller Ergebnisse aus **Abb. 66**; eigene Untersuchungsergebnisse und Ergebnisse aus [13, 79] sowie dem Teilprojekt der Hochschule München des Forschungsprojekts „KoMICS“; ein Messpunkt entspricht dem Mittelwert einer Serie; Angabe der Trendlinien aus Prognose- und Konfidenzintervall mit Angabe der Funktionen der oberen Grenzen

7.3 EMPFEHLUNG FÜR DAS VORGEHEN IN DER PRAXIS

Wie sich die in **Abb. 67** gezeigten Regressionsfunktionen im praktischen Anwendungsfall auswirken können, wird in **Abb. 68** an einer exemplarischen Probe des Aufgabenteils der Hochschule München im „KoMICS“ Forschungsprojekt betrachtet, deren Messergebnisse der Elementstromdichten in [157] veröffentlicht wurden. Der in **Kapitel 7.1** erläuterte Trocknungs- und Rückbefeuchtungszyklus kann **Abb. 68** entnommen werden, in der ebenfalls der Verlauf der Makroelementstromdichte i_{makro} der Messanode einer exemplarischen CEM I-Probe dargestellt ist.

Mit den Regressionsfunktionen aus **Abb. 67** wird die Makroelementstromdichte i_{makro} aus **Abb. 68** über die sich ergebenden Eigenkorrosionsanteile EK in eine rechnerische Korrosionsstromdichte $i_{\text{korr,cal}}$ nach **Gleichung 25** aus **Kapitel 4.5** überführt und der zum jeweiligen Zeitpunkt errechnete Eigenkorrosionsanteil EK angegeben. Dabei wird zwischen der Regressionsfunktion der Messwerte (RMW) sowie der Regressionsfunktion der oberen 90 %-Konfidenz- und Prognoseintervallgrenze aus **Abb. 67** unterschieden.

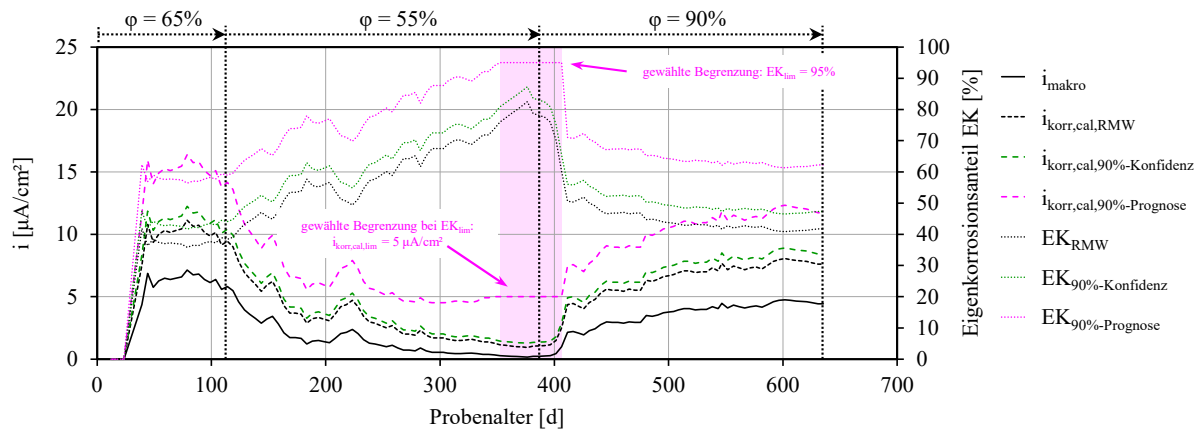


Abb. 68: exemplarischer Verlauf der Makroelementstromdichte i_{makro} einer CEM I-Probe aus dem Teilprojekt der Hochschule München des Forschungsprojekts „KoMICS“ [157]; Anhand **Abb. 67** aus i_{makro} errechnete Korrosionsstromdichten $i_{\text{korr,cal}}$ mit zugehörigen Eigenkorrosionsanteilen EK

In **Abb. 68** lässt sich gut erkennen, dass die Eigenkorrosionsanteile durch die hinterlegten Regressionsfunktionen insbesondere bei Feuchteänderungen im Beton deutlich variieren können. Dies ist in der Praxis auch zu erwarten, da sich kontinuierlich Änderungen im Korrosionssystem Stahl/Beton ergeben werden. Über die Regressionsfunktionen kann diesem Sachverhalt Rechnung getragen werden. Dennoch bleibt anzumerken, dass sich aufgrund der generellen Streuungen bei der Eigenkorrosion auch hier individuelle Abweichungen ergeben können, die gesondert berücksichtigt werden müssen. So liefert der dargestellte Kurvenverlauf einen integralen Eigenkorrosionsanteil von rd. 50 % bezogen auf die Regressionsfunktion der Messwerte (RMW). Der tatsächlich nach Probenausbau festgestellte Eigenkorrosionsanteil der Probe lag bei rd. 59 %. Insbesondere bei Anteilen über 50 % macht sich die Eigenkorrosion relativ stark bemerkbar, da hier der daraus resultierende Eigenkorrosionsfaktor f_{eigen} , mit dem die Makroelementstromdichten i_{makro} multipliziert werden, um den rechnerischen Korrosionsstrom $i_{\text{korr,cal}}$ zu erhalten, Werte über Faktor 2 annimmt (90 % Eigenkorrosionsanteil entsprechen $f_{\text{eigen}} = 10$).

Die Abweichung der rechnerischen Korrosionsstromdichten aus der Regressionfunktion der Messwerte $i_{\text{korr,cal,RMW}}$ aus **Abb. 67** (**schwarze Trendlinie**) resultiert dabei in einem Fehler von rd. 1 M.-%, um den der tatsächliche korrosionsbedingte Masseverlust MV_{korr} von rd. 4,6 M.-% im vorliegenden Beispiel unterschätzt wird. Der Fehler ist dennoch deutlich geringer, als die sich ergebende Abweichung ohne Berücksichtigung des Eigenkorrosionsanteils von rd. 2,7 M.-%. Die Regressionsfunktion des oberen Konfidenzintervalls aus **Abb. 67** (**grüne**

Trendlinie) führt vorliegend nur noch zu einer Unterschätzung von MV_{korr} um rd. 0,5 M.-%. Bei Anwendung der Regressionsfunktion des oberen Prognoseintervalls aus **Abb. 67** (**rosa Trendlinie**) wird MV_{korr} hingegen um rd. 1,6 M.-% überschätzt.

Wichtig ist, dass die Regressionsfunktionen nicht ohne individuelle Wertüberprüfung angewendet werden sollten. In **Abb. 68** wurden die Eigenkorrosionsanteile auf maximal 95 % begrenzt und in diesem Bereich die rechnerischen Korrosionsstromdichten mit einem Limit von $i_{\text{korr,cal,lim}} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ berücksichtigt. Die Begrenzung ist der Tatsache geschuldet, dass im Bereich sehr hoher Eigenkorrosionsraten die errechneten Korrosionsstromdichten aufgrund des starken Anstiegs von f_{eigen} schlagartig zu einem unplausibel hohen Ausschlag führen können. Die Wahl von $i_{\text{korr,cal,lim}} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ orientiert sich an dem errechneten Kurvenverlauf vor Beginn des Ausschlags.

Für den Praxisfall kann daher ein empfehlenswertes Vorgehen sein, zu Beginn die am Bauwerk gemessenen Makroelementstromdichten i_{makro} mit der Regressionsfunktion des oberen 90 %-Prognoseintervalls aus **Abb. 67** (**rosa Trendlinie**) zu verrechnen. Sofern sich die hieraus abgeleiteten rechnerischen Korrosionsstromdichten $i_{\text{korr,cal,90\%-Prognose}}$ als kritisch erweisen, wäre eine sukzessive Reduktion der Messwertverrechnung mit der nachfolgenden Regressionsfunktion beispielsweise mittels eines genaueren Nachweises möglich. Dieser Nachweis könnte über den Ausbau und die visuelle Verifizierung der Messdaten an einzelnen Sensoren erbracht werden, um eine Ergebnisinterpretation auf der sicheren Seite zu belegen.

Voraussetzung für die Anwendung der Regressionsfunktionen aus Abb. 67 ist die messtechnisch möglichst exakte Bestimmung von i_{makro} und das Vorliegen eines zielführenden Versuchssetups. Die Regressionsfunktionen können aufgrund der Streuungen der Eigenkorrosionsanteile auch nur als Näherung betrachtet werden, die im jeweiligen Einzelfall gesondert zu prüfen sind, da sonst auch eine Ergebnisinterpretation auf der unsicheren Seite entstehen kann. Die Regressionsfunktionen gehen auf der sicheren Seite liegend immer von aktiv ablaufenden Korrosionsprozessen aus. Bei sehr kleinen Makroelementstromdichten i_{makro} , die mit entsprechend hohen Eigenkorrosionsanteilen behaftet sind, können dadurch auch Verzerrungen der realen Verhältnisse entstehen, die sinnvollerweise korrigiert werden müssen, wie der Verlauf von $i_{\text{korr,cal,90\%-Prognose}}$ in **Abb. 68 zeigt.**

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit zeigt den Einfluss von abnehmender Feuchtigkeit verschiedener chloridhaltiger Betone auf die Eigenkorrosion von Bewehrungsstählen. Dadurch soll eine bessere Einschätzung der Messergebnisse bei Anwendung eines Korrosionsmonitorings, insbesondere an Bestandsobjekten, ermöglicht werden.

Über eine künstliche Trocknung, die gleichzeitig eine Vorschädigung aller Proben ohne elektrochemische Halteversuche ermöglichte, konnten die Proben im Rahmen der hier durchgeführten Versuche auf definierte Ausgleichsfeuchten gebracht werden. In dieser Phase nicht vernachlässigbare, elektrochemisch jedoch nicht erfassbare Korrosionsprozesse wurden über Blindproben abgeglichen. Durch hochauflösende Messungen der sehr kleinen Makroelementströme bei trockener Lagerung mittels Potentiostaten wurden Voraussetzungen für eine möglichst genaue Untersuchung bei geringen Probenfeuchten geschaffen. Über topometrische Untersuchungen mittels Laserprofilometrie und Digitalmikroskopie konnten Rückschlüsse auf die Querschnittsverluste der ausgebauten Stahlproben gezogen werden.

Die Trocknung beeinflusst letztendlich alle korrosionsrelevanten Parameter und führt zu einer geringeren Potentialdifferenz Messanode-Messkathode, höheren Elektrolytwiderständen und höheren Polarisationswiderständen. Maßgeblich für die kleineren Makroelementströme ist jedoch in seiner Größenordnung der Polarisationswiderstand der Messanode verantwortlich, was sich mit Untersuchungen nach *Hiemer et al.* [7] im Rissbereich deckt.

Der Eigenkorrosionsanteil steigt mit abnehmender Probenfeuchte und kann je nach Umgebungsbedingung, Chloridgehalt und Betonzusammensetzung auch Werte über 90 % annehmen, was bedeutet, dass über 90 % der Korrosionsraten durch das Korrosionsmonitoring nicht erfasst werden können. Während bei feuchten Umgebungsbedingungen die Eigenkorrosionsanteile der untersuchten CEM I-Betone zwischen rd. 10 % bis 50 %, analog zu Ergebnissen aus *Harnisch* [13] lagen, ließ sich auch bei moderaten Feuchtezuständen der Eigenkorrosionsanteil analog zu Ergebnissen aus [79, 81] mit einem Faktor f_{eigen} von 2 bis 3 auf die Makroelementströme noch gut erfassen. Als kritisch für die Beurteilung stellten sich hier CEM III-Betone heraus, die bei jeder untersuchten Feuchtigkeit einen hohen Eigenkorrosionsanteil zeigten. Bei hohen Eigenkorrosionsanteilen und trockener Lagerung ergaben sich bei den dargestellten Untersuchungen

jedoch auch sehr geringe gravimetrische Masseverluste, die letztendlich nur schwer vom Blindprobenwert differenzierbar waren. Dennoch sollte dieser Anteil der Eigenkorrosion mit berücksichtigt werden, sofern die Korrosionsprozesse noch nicht eindeutig zum Erliegen gekommen sind. Dies ist insbesondere relevant, sofern bereits bei höheren Bauteilfeuchten größere Querschnittsverluste an der Bewehrung eingetreten sind.

Letztendlich können im Rahmen dieser Arbeit jedoch manche Fragestellungen nicht abschließend beantwortet werden. Eine der wichtigsten Fragestellungen, die hierbei offen bleibt, ist die Auswirkung durch nachträglich eingeschleppte Chloride auf die Eigenkorrosion. Ebenso ergaben sich bei den hier gezeigten Versuchen nur geringe Querschnittsverluste an den trockenen Proben. Ob sich in Bereichen hoher Querschnittsverluste, die nachträglich einer Trocknung unterliegen, größere und nicht elektrochemisch erfassbare Schädigungen im Narbengrund ergeben können, bleibt ebenso offen. Diese wären beispielsweise durch eine feuchtere Abkapselung von den umliegend trockeneren Bereichen denkbar. Dabei ist jedoch fraglich, ob bei Bauwerken mit sehr hohen Querschnittsverlusten ein Korrosionsmonitoring generell noch Anwendung finden sollte. Ein Vergleich zu Ergebnissen der Eigenkorrosion im Rissbereich bei starker Austrocknung würde sich ebenfalls als interessant darstellen, da Rissbereiche praxisrelevanter für die Schädigung durch Chloride sind als ungerissene Stahlbetonbauteile. Die untersuchten Feuchtegehalte wurden alle durch Desorption (Feuchteabgabe) der Betone erreicht, was den in der Regel praxisrelevanteren Fall darstellt. Ob sich bei Adsorption (Feuchteaufnahme) mit gleichen Feuchtegehalten der Betone ähnliche Eigenkorrosionsanteile der Messanoden ergeben, kann mit den durchgeführten Versuchen nicht geklärt werden.

Für die Abschätzung des Eigenkorrosionsanteils konnte durch die eigenen Versuche und der ergänzenden Auswertung von Literaturergebnissen eine Regressionsfunktion gefunden werden, die die Abhängigkeit des Eigenkorrosionsanteils von der Makroelementstromdichte i_{makro} bei einer Vielzahl an variierten Parametern hinreichend gut beschreibt. Die im Rahmen dieser Arbeit gezeigten Versuche schlagen, aufgrund des weiten Feuchtespektrums, das untersucht wurde, die Brücke zu bereits bestehenden Literaturergebnissen aus [13, 79] und dem Teilprojekt der Hochschule München des Forschungsprojekts „KoMICS“. Der Charme, der sich aus einer Abschätzung des zu erwartenden Eigenkorrosionsanteils aus den Makroelementstromdichten i_{makro} ergibt, ist die einfache Übertragbarkeit im Rahmen eines Korrosionsmonitorings. Da i_{makro} der Hauptparameter ist, der bei der Interpretation der Ergebnisse von Relevanz

ist, wird dieser in der Regel erfasst. Damit lässt die Abschätzung des Eigenkorrosionsanteils über die Regressionsfunktion zu i_{makro} eine näherungsweise Kompensation der Eigenkorrosion unabhängig von Zeitpunkt und Randbedingung der Messung zu. Für die Regressionsfunktion mit der zugehörigen statistischen Betrachtung und den Anwendungsgrenzen wird auf **Kapitel 7** dieser Arbeit verwiesen. Wichtig ist, dass diese Regressionsfunktion auch nur eine Näherung darstellt, mit der der Eigenkorrosionsanteil abgeschätzt werden kann. Untersuchungen zur Eigenkorrosion können generell mit einer großen Streuung der Einzelwerte auch innerhalb gleicher Serien behaftet sein.

Der Einbau der Sensorik und die Beurteilung von Messdaten am Bauwerk wird immer mit Sachverstand erfolgen müssen, und die Plausibilität von Messergebnissen sollte auch immer geprüft werden. Zur Verifizierung des jeweiligen Korrosionszustands über die Zeit wird man um die Wahl ausreichender Sensorstellen nicht umhinkommen, damit auch zu bestimmten Zeitpunkten einzelne Sensoren für eine visuelle Beurteilung entnommen werden können.

9 VERZEICHNISSE

9.1 LITERATUR

- [1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: *Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung): Teil 1 - Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung*. Berlin: Beuth, 2020.
- [2] SCHIEBL, P.; MAYER, T. F.: Lebensdauermanagementsystem – Teilprojekt A2. In: DAfStb (Hrsg.): *Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton"*. 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2007 (Schriftenreihe des DAfStb, Heft 572), S. 49–100.
- [3] YILMAZ, D.; ANGST, U.: *Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020), Nr. 6, S. 448–458.
- [4] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Bruttoinlandsprodukt*. URL <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/bip-bubbles.html> – Überprüfungsdatum 2022-03-22.
- [5] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E.V. (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie - Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen*. Berlin: Beuth, 2001.
- [6] BECKER, F.; DAUBERSCHMIDT, C.: *Investigation on the effectiveness of the repair method 8.3 "Corrosion protection by increasing the electrical resistivity" in chloride-containing concrete Part 3: The influence on corrosion of chloride-contaminated concretes under protective coatings*. In: *Materials and Corrosion* 71 (2020), Nr. 5, S. 716–725.
- [7] HIEMER, F.; JAKOB, D.; KEBLER, S.; GEHLEN, C.: *Chloride induced reinforcement corrosion in cracked and coated concrete: From experimental studies to time-dependent numerical modeling*. In: *Materials and Corrosion* 69 (2018), Nr. 11, S. 1526–1538.
- [8] KEBLER, S.; HIEMER, F.; GEHLEN, C.: *Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem Stahlbeton*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), Nr. 4, S. 198–206.
- [9] LAY, S.; BRANDES, C.; RUCKER-GRAMM, P.: *Praxisbericht zum Korrosionsmonitoring in Rissen mit Behandlung nach dem Prinzip W-Cl: 24. + 25.01.2012 Technische Akademie Esslingen e.V., Ostfildern*. In: *5. Kolloquium Verkehrsbauten - Schwerpunkt Parkbauten* (2012).

- [10] MAYER, T. F.; DAUBERSCHMIDT, C.; BRUNS, M.; EICHLER, T.; WIENS, U.; MIETZ, J.; GEHLEN, C.; EBELL, G.; GERHARD, G.; OSTERMINSKI, K.: *Das Instandsetzungsprinzip W-Cl*. In: *Bautechnik* 97 (2019), Nr. 1, S. 2–10.
- [11] DGZFP-FACHAUSSCHUSS FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG IM BAUWESEN (Hrsg.): *Merkblatt B 12: Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken*. Berlin, 2018.
- [12] BECK, M. F.: *Zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Bauingenieurwesen. Dissertation. 2010.
- [13] HARNISCH, J.: *Zum zeitabhängigen Verhalten elektrochemischer und morphologischer Kenngrößen bei der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation. 2012.
- [14] SCHIEGG, Y.: *Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Dissertation. 2002.
- [15] TUUTTI, K.: *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute. Dissertation. 1982.
- [16] DIN EN ISO 8044:2020-08. *Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe*.
- [17] JAYALAKSHMI, M.; MURALIDHARAN, V. S.: *Empirical and Deterministic Models of Pitting Corrosion - An Overview*. In: *Corrosion Reviews* 14 (1996), 3-4, S. 375–402.
- [18] WAGNER, C.: *Models for Lattice Defects in Oxide Layers on Passivated Iron and Nickel*. In: *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie* 77 1973, Nr. 12, S. 1090-1097.
- [19] ANGST, U. M.; GEIKER, M. R.; MICHEL, A.; GEHLEN, C.; WONG, H.; ISGOR, O. B.; ELSENER, B.; HANSSON, C. M.; FRANÇOIS, R.; HORNBOSTEL, K.; POLDER, R.; ALONSO, M. C.; SANCHEZ, M.; CORREIA, M. J.; CRIADO, M.; SAGÜÉS, A.; BUENFELD, N.: *The steel–concrete interface*. In: *Materials and Structures* 50 (2017), Nr. 2, S. 1–24.
- [20] ALVAREZ, M. G.; GALVELE, J. R.: *The mechanism of pitting of high purity iron in NaCl solutions*. In: *Corrosion Science* 24 (1984), Nr. 1, S. 27–48.

- [21] TAFFE, A.; DEREK, I.; SCHRÖDER, C.: *Untersuchungen zur Detektion von Untersuchungen zur Detektion von Querschnittsverlusten mit Hilfe eines neu entwickelten portablen Magnetfeldsensors* (Fachtagung Bauwerksdiagnose, 15. - 16. Februar 2018 (DGZfP Bau-2018)). Berlin.
- [22] RAUPACH, M.: *Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton*. Dissertation. Berlin: Beuth, 1992 (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton Heft 433).
- [23] HERMANN, K.; HUNKELER, F.: *Karbonisierung von Betonen*. In: *Cementbulletin* 67 (1999), Nr. 12
- [24] STEFFENS, A.: *Modellierung von Karbonatisierung und Chloridbindung zur numerischen Analyse der Korrosionsgefährdung der Betonbewehrung*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Institut für Statik. Dissertation. 2000.
- [25] GEHLEN, C.: *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Dissertation. Berlin: Beuth, 2000 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 510).
- [26] FICK, A.: *Ueber Diffusion*. In: *Annalen der Physik* 170 (1855), Nr. 1, S. 59–86.
- [27] SCHIEBL, P.: *Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Beton*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 255, Dissertation: Ernst & Sohn, 1976 (DAfStb-Heft).
- [28] HANSSON, C. M.; POURSAEE, A.; LAURENT, A.: *Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes*. In: *Cement and concrete research* 36 (2006), Nr. 11, S. 2098–2102.
- [29] MENZEL, K.: *Karbonisierungszellen - Ein Beitrag zur Korrosion von Stahl in karbonatisiertem Beton*. In: *Materials and Corrosion* 39 (1988), Nr. 3, S. 123–129.
- [30] WENDLER-KALSCH, E.; GRÄFEN, H.: *Korrosionsschadenkunde: Grundlagen der Korrosion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998 (Klassiker der Technik).
- [31] BAMFORTH, P. B.: *The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials*. In: *Magazine of Concrete Research* 51 (1999), Nr. 2, S. 87–96.
- [32] NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R.: *Chloride diffusion in partially saturated cementitious material*. In: *Cement and concrete research* 33 (2003), Nr. 1, S. 133–138.

- [33] BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J.: *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review*. In: *Construction and Building Materials* (2001), Nr. 15, S. 93–103.
- [34] KAPTEINA, G.: *Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken*. München, Technische Universität München, Bauingenieur- und Vermessungswesen. Dissertation. 2011.
- [35] TANG, L.: *Chloride Transport in Concrete: Measurement and Prediction*. Göteborg, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials. Dissertation. 1996.
- [36] THOMAS, M. D. A.; BAMFORTH, P. B.: *Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag*. In: *Cement and concrete research* 29 (1999), Nr. 4, S. 487–495.
- [37] MÜLLER, H. S.; Vogel, M.: *Schädigungsmechanismen von Beton- und Stahlbeton: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 10. März 2016*. Bauwerkserhaltung - Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau. In: *12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung* (2016), S. 9-20.
- [38] KNOBLAUCH, H.; SCHNEIDER, U.: *Bauchemie*. 7. Aufl. Köln: Werner, 2013 (Werner-Ingenieur-Texte WIT).
- [39] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G.: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*. S.640. 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
- [40] SCHIEBL, P.; RAUPACH, M.: *Influence of Concrete Composition and Microclimate on the Critical Chloride Content in Concrete*. In: *Corrosion of Reinforcement in Concrete, International Symposium, Wishaw, Warwickshire, UK* (1990), 21-24 May 1990 (Page, C.L.; Treadaway, K.W.J.; Bamforth, P.B. (Ed.)), S. 49–58.
- [41] BREIT, W.; DAUBERSCHMIDT, C.; GEHLEN, C.; SODEIKAT, C.; TAFFE, A.; WIENS, U.: *Zum Ansatz eines kritischen Chloridgehaltes bei Stahlbetonbauwerken*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 5, S. 290–298.
- [42] BREIT, W.: *Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Sachstand und neuere Untersuchungen*. In: *Betontechnische Berichte (Verein Deutscher Zementwerke e.V.)* (1998-2000), S. 145–168.

- [43] BREIT, W.: *Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation. 1997.
- [44] BOSCHMANN KÄTHLER, A. C.: *Chloride-Induced Reinforcement Corrosion in Concrete: The Role of the Steel-Concrete Interface and Implications for Engineering*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Dissertation. 2019.
- [45] WIENS, U.: *Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridduzierte Korrosion von Stahl in Beton*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbetonbau, Heft 551, Dissertation. 1. Auflage. Berlin: Beuth, 2005 (551).
- [46] HARNISCH, J.; RAUPACH, M.: *Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt unter Berücksichtigung der Kontaktzone zwischen Stahl und Beton: 25. + 26.01.2011 Technische Akademie Esslingen e.V. Ostfildern*. In: 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken (2011).
- [47] FRAUNDORFER, A.; RIPA, F.; DAUBERSCHMIDT, C.: *Dauerhaftigkeit chloridexponierter Stahlbetonbauteile mit hochlegierter Bewehrung – Übertragung von Untersuchungsergebnissen zu wirtschaftlichen Ausführungen bei Tiefgaragen: 08. + 09.02.2022, Technische Akademie Esslingen e.V. Ostfildern*. In: 10. Kolloquium Parkbauten (2022).
- [48] HARNISCH, J.; RAUPACH, M.: *Investigations Into the Time to Corrosion and Corrosion Initiating Chloride Contents for Steel in Concrete*. In: Eurocorr 2010 13 to 17 September 2010 - Moscow/Russia.
- [49] GOUDA V. K.: *Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel I*. In: *British Corrosion Journal* (1970), Nr. 5, S. 198–203.
- [50] DAUBERSCHMIDT, C.: *Untersuchungen zu den Korrosionsmechanismen von Stahlfasern in chloridhaltigem Beton*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation. 2006.
- [51] TRITTHART, J.; GEYMAYER, H.: *Aspekte zur Chloridkorrosion*. In: *Baustoffe* 85 (1985), S. 229–234.
- [52] PAGE, C. L.; HAVDAHL, J.: *Electrochemical monitoring of corrosion of steel in microsilica cement pastes*. In: *Materiaux et Constructions* 18 (1985), Nr. 103, S. 41–47.
- [53] HOPE, B. B.; IP, A. K. C.: *Chloride corrosion threshold in concrete*. In: *ACI Materials Journal* 84 (1987), Nr. 4, S. 306–314.

- [54] STARK, J.; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [55] FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H.: *Chloride binding related to hydration products: Part I: Ordinary Portland Cement*. In: *Cement & Concrete Research* (2012), S. 282–290.
- [56] BÄUMEL, A.; ENGELL, H.-J.: *Korrosion von Stahl in Beton*. In: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 30 (1959), Nr. 7, S. 417–428.
- [57] BÄUMEL, A.: *Die Auswirkung von Betonzusatzmitteln auf das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton*. In: *Zement-Kalk-Gips* 12 (1959), Nr. 7, S. 294–305.
- [58] RECHBERGER, P.: *Grundsätzliche Untersuchungen an Stahl in alkalisch-wässriger Lösung bei Gegenwart von Chloriden als Modell für das Verhalten von Stahleinlagen im Beton unter Chlorideinwirkung*. In: *Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten* (1980), Forschungsbericht Nr. P 1.
- [59] DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; OLLIVIER, J.-P.; JULIEN, S.; HAZRATI, K.: *Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems*. In: *Advanced Cement Based Materials* 6 (1997), Nr. 1, S. 28–35.
- [60] UNGRICH, H.: *Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Dissertation. 2004.
- [61] KIEBL, K.: *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen: Rechnerische Erfassung und bauphysikal. Anwendung*. Essen, Univ., FB Bauwesen, Dissertation, 1983.
- [62] REINERS, J.; SCHNEIDER, M.: *Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport in Betonen und Zementestrichen sowie auf den hieraus resultierenden Feuchtegehalt unter verschiedenen Umweltbedingungen*. Düsseldorf, 2017.
- [63] FUNK, M.: *Hysteresis der Feuchtespeicherung in porösen Materialien*. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2012.
- [64] RUCKER-GRAMM, P.: *Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen*. München, Technische Universität München. Dissertation. 2008.

- [65] BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E.: *On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases*. In: *Journal of the American Chemical Society* 62 (1940), Nr. 7, S. 1723–1732.
- [66] BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E.: *Adsorption of Gases in Multimolecular Layers*. In: *Journal of the American Chemical Society* 60 (1938), Nr. 2, S. 309–319.
- [67] MASON, G.: *The effect of pore space connectivity on the hysteresis of capillary condensation in adsorption—desorption isotherms*. In: *Journal of Colloid and Interface Science* 88 (1982), Nr. 1, S. 36–46.
- [68] WILKOSZ, D. E.; YOUNG, J. F.: *Effect of Moisture Adsorption on the Electrical Properties of Hardened Portland Cement Compacts*. In: *Journal of the American Ceramic Society* 78 (1995), Nr. 6, S. 1673–1679.
- [69] JOHANNESSEN, B.: *Transport and sorption phenomena in concrete and other porous media*. Sweden, Lund University, Division of Building Materials. Dissertation. 2000.
- [70] ESPINOSA, R. M.; FRANKE, L.: *Inkbottle Pore-Method: Prediction of hygroscopic water content in hardened cement paste at variable climatic conditions*. In: *Cement and concrete research* 36 (2006), Nr. 10, S. 1954–1968.
- [71] ZHANG, Y.; ZHANG, M.: *Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review*. In: *Construction and Building Materials* 72 (2014), S. 367–379.
- [72] FAGERLUND, G.: *Moisture design with regard to deterioration of materials and structures - with special reference to frost destruction*. Report TVBM; Vol. 3130. Schweden: Division of Building Materials, LTH, Lund University, 2006.
- [73] EVERETT, D. H.; HAYNES, J. M.: *Model studies of capillary condensation. I. Cylindrical pore model with zero contact angle*. In: *Journal of Colloid and Interface Science* 38 (1972), Nr. 1, S. 125–137.
- [74] KLOPFER, H.: *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen: Insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1972. Wiesbaden: Bauverl., 1974.
- [75] KAST, W.; JOKISCH, F.: *Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen und zur Sorptionskinetik an porösen Feststoffen*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 44 (1972), Nr. 8, S. 556–563.

- [76] FRAUNDORFER, A.; HEILMAYER, T.; DAUBERSCHMIDT, C.; GEHLEN, C.: *Moisture Sorption Behaviour of Concrete Mixtures Containing Chlorides and the Resulting Electrolytic Resistivity in Relation to the Estimated Corrosion Risk*. In: *MATEC Web of Conferences* 364 (2022), Nr. 02023.
- [77] SCHIEBL, P.; RAUPACH, M.: *Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton*. In: *Beton-Informationen* (1988), 3/4, S. 33–45.
- [78] WENDLER-KALSCH, E.; GRÄFEN, H.: *Korrosionsschadenkunde*. Nachdr. der 1. Aufl. 1998. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012 (Klassiker der Technik).
- [79] BECK, M.; BURKERT, A.; FAULHABER, A.; GEHLEN, C.; HARNISCH, J.; ISECKE, B.; LEHMANN, J.; OSTERMINSKI, K.; RAUPACH, M.; SCHIEBL, P.; TIAN, W.; WARKUS, J.: *Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion – Teil 1: Systemparameter der Bewehrungskorrosion*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2012 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 601).
- [80] BOHNER, E.; FISCHER, C.; GEHLEN, C.; MÜLLER, H. S.; OSTERMINSKI, K.; OŽBOLT, J.; SCHIEBL, P.; GREVE-DIERFELD, S. von: *Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion: Teil 2: Dauerhaftigkeitsbemessung*. Berlin: Beuth, 2012 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 602).
- [81] OSTERMINSKI, K.: *Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton: Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen*. München, Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt. Dissertation. 2013.
- [82] STERN, M.; GEARY, A. L.: *Electrochemical Polarization*. In: *Journal of The Electrochemical Society* 104 (1957), Nr. 1, S. 56.
- [83] MORALES, J. A.; TORRES, J.; REBOLLEDO, N.; SÁNCHEZ, J.: *Experimental and Statistical Analysis of the Corrosion in Tendons in Contact With Water*. In: *Frontiers in Materials* 6 (2019).
- [84] ANDRADE, C.; MARTINEZ, I.; REBOLLEDO, N.; CASTILLO, A.: *Development of an Engineering Approach for Modelling Corrosion Attack*. In: *International RILEM Workshop Integral Service Life Modelling of Concrete Structures, Guimaraes, Portugal, 5-6 November 2007, PRO 56* (2007).

- [85] BAUMGARTNER, A.; FRAUNDORFER, A.; DAUBERSCHMIDT, C.; KUSTERMANN, A.: *Veränderung der mechanischen Kenngrößen von Betonstabstählen durch chloridinduzierte Korrosion*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), Nr. 6, S. 409–418.
- [86] NÜRNBERGER, U.: *Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen*. Band 1 Grundlagen, Betonbau. Band 2: Metallbau, Korrosionsprüfung. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH, 1995.
- [87] GULIKERS, J.: *Critical Review Of Corrosion Deterioration Models For Reinforced Concrete*. In: *9th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Brisbane, Australia* (2002), Nr. 94.
- [88] GULIKERS, J.: *Improved engineering model for the propagation stage of chloride-induced pitting corrosion of steel reinforcement: Madrid, Spain, 9 - 10 September 2004*. In: *Third International RILEM Workshop on Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete* RILEM PRO 38 (2004), S. 257–268.
- [89] RODRIGUES, J.; ORTEGA, L. M.; CASAL, J.; DIEZ, J. M.: *Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures*. Proceedings of the 7th International Conference. In: *Durability of Building Materials and Components, 19-23 May, Stockholm, Sweden* (1996), S. 117–126.
- [90] MIDDLETON, CR.; HOGG, V.: *Review of deterioration models used to predict corrosion in reinforced concrete structures. Technical Report*. In: *Cambridge University, Department of Engineering, Cambridge, UK* (1998).
- [91] VAL, D.; MELCHERS, R. E.: *Reliability analysis of deteriorating reinforced concrete frame structures*. In: *Structural Safety and Reliability, Rotterdam: Balkema* (1998), S. 105–112.
- [92] ALMUSALLAM, A. A.: *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*. In: *Construction and Building Materials* 15 (2001), Nr. 8, S. 361–368.
- [93] ZHANG, W.; SONG, X.; GU, X.; LI, S.: *Tensile and fatigue behavior of corroded rebars*. In: *Construction and Building Materials* 34 (2012), S. 409–417.
- [94] TOSTMANN, K.-H.: *Korrosion: Ursachen und Vermeidung*. S. 77 ff. Weinheim: Wiley-VCH, 2001.
- [95] NÜRNBERGER, U.: *Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen: Band 1: Grundlagen Betonbau. Band 2: Metallbau, Korrosionsprüfung*: Wiesbaden Bauverlag, 1995.

- [96] ANDRADE, C.; ALONSO, C.: *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. In: *Construction and Building Materials* 10 (1996), Nr. 5, S. 315–328.
- [97] DUFFÓ, G. S.; FARINA, S. B.; GIORDANO, C. M.: *Characterization of solid embeddable reference electrodes for corrosion monitoring in reinforced concrete structures*. In: *Electrochimica Acta* 54 (2009), Nr. 3, S. 1010–1020.
- [98] MAYER, T. F.; HARNISCH, J.; EBELL, G.; DAUBERSCHMIDT, C.: *Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), Nr. 9, S. 632–639.
- [99] PRUCKNER, F.; THEINER, J.; ERI, J.; NAUER, G. E.: *In-situ monitoring of the efficiency of the cathodic protection of reinforced concrete by electrochemical impedance spectroscopy*. In: *Electrochimica Acta* 41 (1996), Nr. 7, S. 1233–1238.
- [100] SODEIKAT, C.; DAUBERSCHMIDT, C.; SCHIEBL, P.; GEHLEN, C.; KAPTEINA, G.: *Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken für Public Private Partnership Projekte: Dauerhaftigkeit sichtbar gemacht*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006), Nr. 12, S. 932–942.
- [101] ANDRADE, C.; SARRIA, J.; ALONSO, C.: *Corrosion Rate Field Monitoring of Post-Tensioned Tendons in Contact with Chlorides*. In: *Durability of Building Materials and Components* 7, Vol. 2 (1996), S. 959–967.
- [102] RAUPACH, M.; SCHIEBL, P.: *Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures*. In: *NDT & E International* 34 (2001), Nr. 6, S. 435–442.
- [103] RAUPACH, M.; DAUBERSCHMIDT, C.; WOLFF, L.; HARNISCH, J.: *Monitoring der Feuchteverteilung in Beton: Sensorik und Anwendungsmöglichkeiten*. In: *Beton* 57 (2007), Nr. 1, S. 20–26.
- [104] SCHIEBL, P.; RAUPACH, M.: *Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structures*. In: *Concrete International* 14, Nr. 7
- [105] ANDRADE, C.; ALONSO, C.: *On-site measurements of corrosion rate of reinforcements*. In: *Construction and Building Materials* (2001), Nr. 15, S. 141–145.
- [106] ANDRADE, C.; ALONSO, C.: *Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. In: *Materials and Structures* 37 (2004), Nr. 9, S. 623–643.

- [107] DEUTSCHER BETON- U. BAUTECHNIK-VEREIN E.V.: *Merkblatt Betondeckung und Bewehrung - Sicherung der Betondeckung beim Entwerfen, Herstellen und Einbauen der Bewehrung sowie des Betons nach Eurocode 2*. Fassung Dezember 2015. Berlin, 2015.
- [108] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E.V. (Hrsg.): *Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048*. Berlin: Beuth, 1991 (Heft 422).
- [109] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E.V. (Hrsg.): *Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton*. Berlin: Beuth, 1989 (Heft 401).
- [110] DGZFP-FACHAUSSCHUSS FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG IM BAUWESEN (Hrsg.): *Merkblatt B 3: Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion*. Berlin, 2021.
- [111] KEBLER, S.: *Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen –Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement*. München, Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt. Dissertation. 2014.
- [112] HUNKELER, F.: *Grundlagen der Korrosion und der Potentialfeldmessung bei Stahlbetonbauten*. 510. Aufl. Zürich: Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 1994.
- [113] BÜCHLER, M.; SCHIEGG, Y.: *Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten: Forschungsauftrag AGB2002/007 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)*: SGK, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 2008.
- [114] BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. B.: *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [115] POLDER, R.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, Ø.; GULIKERS, J.; WEIDERT, R.; RAUPACH, M.: *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete*. In: *RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion* (2000), Nr. 33, S. 603–611.
- [116] ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A.: *Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types*. In: *Cement and concrete research* 18 (1988), Nr. 5, S. 687–698.
- [117] COX, R. N.; CIGNA, R.; VENNESLAND, Ø.; VALENTE, T.: *Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete: Final report*. Luxemburg: European Commission, 1997 (COST materials science 509).

- [118] ARRHENIUS, S.: *Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren*. In: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 4U (1889), Nr. 1, S. 226–248.
- [119] MAYER, T. F.; GEHLEN, C.; DAUBERSCHMIDT, C.: Corrosion monitoring in concrete. In: *Techniques for Corrosion Monitoring*; Elsevier, 2021, S. 379–405.
- [120] DIN EN 206-1:2017-1. *Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*.
- [121] DIN 1045-2:2008-08. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*.
- [122] DIN EN 12350-5:2019-09. *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2019*.
- [123] DIN EN 12350-6:2019-09. *Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:2019*.
- [124] DIN EN 12350-7:2019-09. *Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2019*.
- [125] DIN EN 12390-2:2019-10. *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2019*.
- [126] DIN EN 12390-3:2019-10. *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019*.
- [127] DIN EN 933-1:2012-03. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012*.
- [128] ENGELHARDT, H.-J.: *Einfluss von Salzen auf die Hydratation und die Festmaterialeigenschaften von API-Zementen*; DBE Technologie GmbH (2010).
- [129] ELSENER, B.; FLÜCKINGER, D.; WOJTAS, H.; BÖHNI, H.: *Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, 1996.
- [130] MAYER, T. F.: *Zur Korrosion von Stahlschalungen in Fertigteilwerken*. München, Technische Universität München. Dissertation. 2009.
- [131] DIN V 18998:2002-11. *Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Zusatzmitteln nach Normen der Reihe DIN EN 934*.

- [132] DIN EN ISO 17475:2008-07. *Korrosion von Metallen und Legierungen - Elektrochemische Prüfverfahren - Leitfaden für die Durchführung potentiostatischer und potentiodynamischer Polarisationsmessungen (ISO 17475:2005+Cor. 1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 17475:2008.*
- [133] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E.V. (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie - Wärmebehandlung von Beton*. Fassung November 2012. Berlin: Beuth, 2012.
- [134] DIN EN ISO 12571:2013-12. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.*
- [135] DIN EN ISO 12570:2018-07. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur.*
- [136] HEITZ, E.; HENKHAUS, R.; RAHMEL, A.: *Korrosionskunde im Experiment: Untersuchungsverfahren - Meßtechnik - Aussagen*. 2., überarb. Aufl. Weinheim: VCH, 1990.
- [137] DIN 5483-3:1994-09. *Zeitabhängige Größen - Teil 3: Komplexe Darstellung sinusförmig zeitabhängiger Größen.*
- [138] HERRERA HERNÁNDEZ, H.; RUIZ REYNOSO, A. M.; TRINIDAD GONZÁLEZ, J. C.; GONZÁLEZ MORÁN, C. O.; MIRANDA HERNÁNDEZ, J. G.; MANDUJANO RUIZ, A.; MORALES HERNÁNDEZ, J.; OROZCO CRUZ, R.: *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels*. In: EL-AZAZY, M.; MIN, M.; ANNUS, P. (Hrsg.): *Electrochemical Impedance Spectroscopy*: IntechOpen, 2020.
- [139] REICHLING, K.: *Bestimmung und Bewertung des elektrischen Widerstands von Beton mit geophysikalischen Verfahren*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation. 2014.
- [140] PRUCKNER, F.: *Corrosion and protection of reinforcement in concrete – Measurements and interpretation*. Wien, Universität Wien. Dissertation. 2001.
- [141] DIN 40110-1:1994-03. *Wechselstromgrößen; Zweileiter-Stromkreise.*
- [142] FELIU, V.; GONZÁLEZ, J.A; ANDRADE, C.; FELIU, S.: *Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. I. experimental evidence and theoretical predictions*. In: *Corrosion Science* 40 (1998), Nr. 6, S. 975–993.

- [143] FELIU, V.; GONZÁLEZ, J. A.; ADRADE, C.; FELIU, S.: *Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. II. Complications in applying the Stern-Geary equation to corrosion rate determinations*. In: *Corrosion Science* 40 (1998), Nr. 6, S. 995–1006.
- [144] ANGST, U.; BÜCHLER, M.: *On the applicability of the Stern-Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion*. In: *Materials and Corrosion* 66 (2015), Nr. 10, S. 1017–1028.
- [145] WAGNER, C.; TRAUD, W.: *Über die Deutung von Korrosionsvorgängen durch Überlagerung von elektrochemischen Teilvorgängen und über die Potentialbildung an Mischelektroden*. In: *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie* 44 (1938), Nr. 7, S. 391–402.
- [146] ANDRADE, C.; CASTELO, V.; ALONSO, M. C.; GONZALEZ, J. A.: *The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and AC Impedance Methods*. In: *ASTM STP 906, Chaker ed., ASTM Philadelphia* (1986), S. 43.
- [147] DIN 50918:2018-09. *Korrosion der Metalle - Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen*.
- [148] DIN EN ISO 8407:2014-06. *Korrosion von Metallen und Legierungen - Entfernen von Korrosionsprodukten von Korrosionsprobekörpern (ISO 8407:2009); Deutsche Fassung EN ISO 8407:2014*.
- [149] SCHNEIDER, M.; MENG, B.: *Ressourcenschonung bei der Zementerstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand*. In: *Beton-Information* (2000), Heft 1, S. 3–7.
- [150] HUNKELER, F.: *Untersuchungen zum kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbeton im Tunnel San Bernardino*. In: *EVED Bundesamt für Strassenbau VSS Bericht* 508 (1992).
- [151] WAGNER, N.: *Einsatz der Impedanzspektroskopie in der Brennstoffzellenforschung*. In: *tm - Technisches Messen* 78 (2011), Nr. 1, S. 30–35.
- [152] GAMRY INSTRUMENTS: *Measuring the Impedance of Your Reference Electrode*. URL <https://www.gamry.com/application-notes/instrumentation/measuring-the-impedance-of-your-reference-electrode/> – Überprüfungsdatum 2022-03-22.

- [153] KAESCHE, H.: *Die Korrosion der Metalle: Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme*. 3., neubearb. und erw. Aufl., Nachdr. 2011 in veränd. Ausstattung. Heidelberg: Springer, 2011 (Klassiker der Technik).
- [154] WILKE, M.; LERP, M.; LALAU, C.; CAMARGO, M.; SCHMIDT, U.; BUND, A.: *Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl durch Verzinken - Grundlagen*. In: *WOMag* (2013), Nr. 02, S. 1–9.
- [155] POURBAIX, M.: *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions: S. 311*. 2., English ed. Houston, Tex.: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- [156] GONZALEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; FELIU, S.: *Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement*. In: *Cement and concrete research* 25 (1995), Nr. 2, S. 257–264.
- [157] FRAUNDORFER, A.; DAUBERSCHMIDT, C.: *Korrosionsmonitoring in ungerissenem Stahlbeton in der Schädigungsphase – neue Forschungserkenntnisse*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (2022), Nr. 117.
- [158] NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H.: *Applied linear regression models: S. 80*. Homewood, Ill.: Irwin, 1983.

9.2 ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Bedeutung
vs.	versus
-A	Adsorption (hinter der Serienbezeichnung in Diagrammen)
-D	Desorption (hinter der Serienbezeichnung in Diagrammen)
W.-Nr.	Werkstoffnummer
WIG	Wolfram-Inertgas(-Schweißen)
EP	Epoxidharz
PMMA	Polymethylmethacrylat
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Nitrile Butadiene Rubber)
SHE	Standardwasserstoffelektrode
CSE	gesättigte Kupfer-/Kupfersulfatelektrode (Cu/CuSO ₄)
SSE	gesättigte Silber-/Silberchloridelektrode (Ag/AgCl)
Ti/MMO	Mischmetalloxidbeschichtetes Titan (Titanmischoxid)
SPK	Strom-Potentialkurve
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie

9.3 SYMBOLE

Symbol	Einheit	Bedeutung
t	[s]	Zeit
A	[m ²]	Fläche (allgemein)
V	[m ³]	Volumen (allgemein)
m	[kg]	Masse (allgemein)
n	[-]	Probenanzahl
MV	[%]	Masseverlust der Messanoden bezogen auf die Referenzmasse
QV	[%]	Querschnittsverlust der Messanoden bezogen auf den Ursprungsquerschnitt
EK	[%]	Eigenkorrosion / Eigenkorrosionsanteil
k_{eigen}	[-]	Eigenkorrosionsfaktor
X	[m]	Schädigungstiefe
U	[V]	Spannung
E	[V]	Potential (allgemein)
I / i	[A] / [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Strom (absolut) / Stromdichte (spezifisch)
R	[Ω]	Widerstand (allgemein)
R _p	[Ω]	Polarisationswiderstand (absolut)
f	[Hz]	Frequenz
Z	[Ω]	Betrag der Impedanz
ρ	[Ωm]	spezifischer Elektrolytwiderstand
C	[F]	elektrische Kapazität
ϕ	[°]	Phasenwinkel
ω	[Hz]	Kreisfrequenz
α_{pit}	[-]	Pittingfaktor
ϱ	[kg/dm ³]	Dichte
φ	[%]	relative Luftfeuchtigkeit
ϑ	[°C]	Temperatur

Δ	[-]	Differenz (immer in Bezug auf eine Messgröße mit deren Einheit)
u	[%]	massebezogener Feuchtegehalt, hier: Betonfeuchte
u_r	$[u/u_{\max}]$	relative Betonfeuchte (bezogen auf die maximale Feuchteaufnahme bei Wassersättigung)

9.4 INDIZES

Index	Bezug auf ...
a	... die Messanode
b	... den Durchbruch/das Durchbruchpotential
d	... die Diffusion/den Diffusionsgrenzstrom
m	... das Monitoring
St	... die Stahlelektrode
k	... die Messkathode
Ti	... die Titanmischoxidelektrode
AE	... die Arbeitselektrode
GE	... die Gegenelektrode
RE	... die Referenzelektrode
OC	... Open Circuit, Messanode und Messkathode nicht verbunden (bei Messung des Ruhepotentials/freien Korrosionspotentials)
eigen	... die Eigenkorrosion
makro	... das Makroelement/den Makroelementstrom
korr	... die Korrosion/den Korrosionsstrom (im Kurzschluss Messanode und Messkathode)
gleich	... einen homogenen Korrosionsabtrag
cal	... einen berechneten Wert
e	... den Einbauzustand
nb	... nach dem Beizprozess
bk20	... die Beizezeitkorrektur zu 20 min Referenzzeit
bk	... die vollständige Beizezeitkorrektur
blind	... die Blindproben
start	... den Anfangswert
trock	... die Trocknung
f	... den feuchten Zustand
t	... den ofentrockenen Zustand
ZRA	... die ZRA-Messung (Zero Resistance Ammeter)
P	... den Polarisationswiderstand (allgemein); ohne zusätzlichen Index immer auf die Messanode bezogen
el	... den Elektrolyten
φ	... die Lagerungsfeuchte
pol	... den polarisierten Zustand (Bezugspotential von E_{oc} ausgelenkt)
P _{dyn}	... einen potentiodynamisch ermittelten Wert
P _{stat}	... einen potentiostatisch ermittelten Wert
TWP	... die Tragwerksplanung betreffend
RMW	... die Regressionsfunktion der Messwerte
lim	... einen Grenzwert

ANHANG A: DIAGRAMME

A.1 WÄRMEBEHANDLUNG UND VORSCHÄDIGUNG

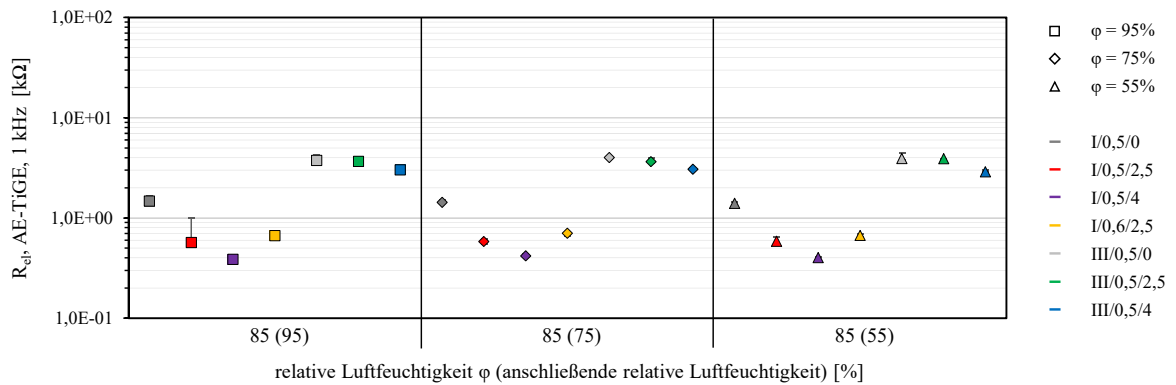


Abb. A.1 - 1: Elektrolytwiderstände R_{ei} aller Serien zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegen-
elektrode; $f = 1 \text{ kHz}$; **vor** der Wärmebehandlung – Mediane, Min- und Max-Werte
– **Versuchsreihe B**

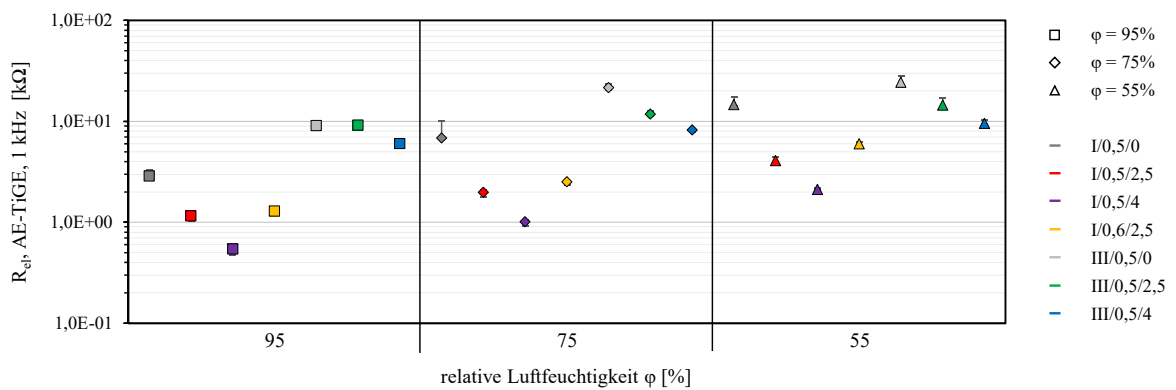


Abb. A.1 - 2: Elektrolytwiderstände R_{ei} aller Serien zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegen-
elektrode; $f = 1 \text{ kHz}$; **nach** der Wärmebehandlung und Ruhephase – Mediane,
Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

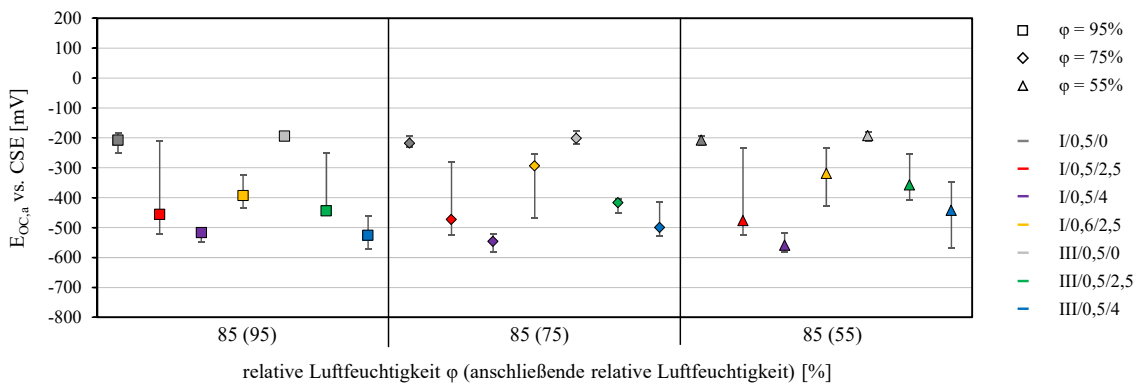


Abb. A.1 - 3: Eoc der Messanoden vs. CSE aller Serien **vor** der Wärmebehandlung; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

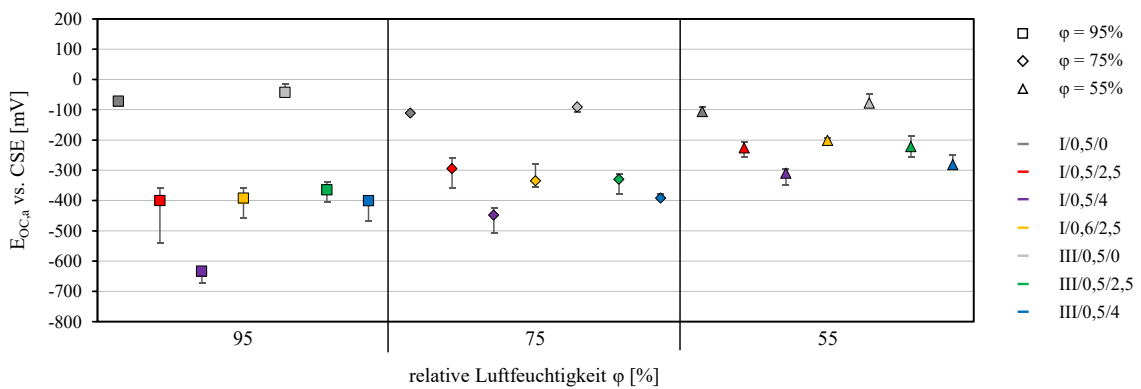


Abb. A.1 - 4: Eoc der Messanoden vs. CSE aller Serien **nach** der Wärmebehandlung und Ruhephase; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

A.2 FEUCHTEGEHALTE UND ELEKTROLYTWERSTÄNDE

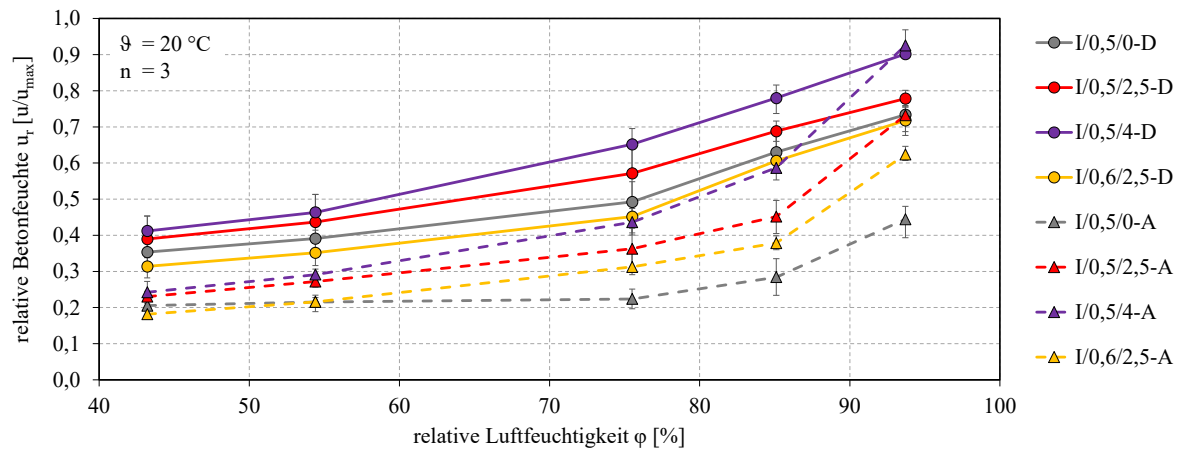


Abb. A.2 - 1: Sorptionsisothermen CEM I-Betone; relative Betonfeuchte; Mittel-, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe A** [76]

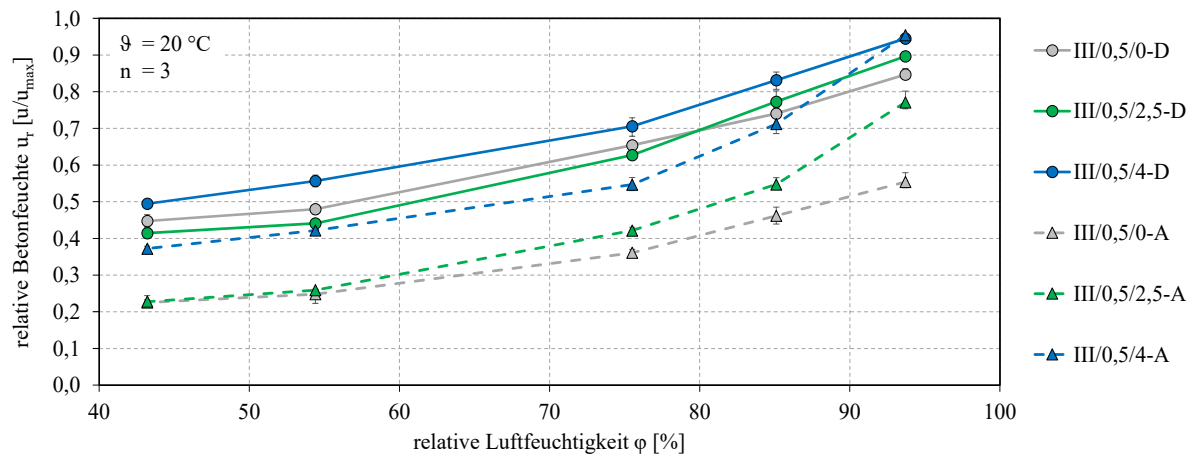


Abb. A.2 - 2: Sorptionsisothermen CEM III/A-Betone; relative Betonfeuchte; Mittel-, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe A** [76]

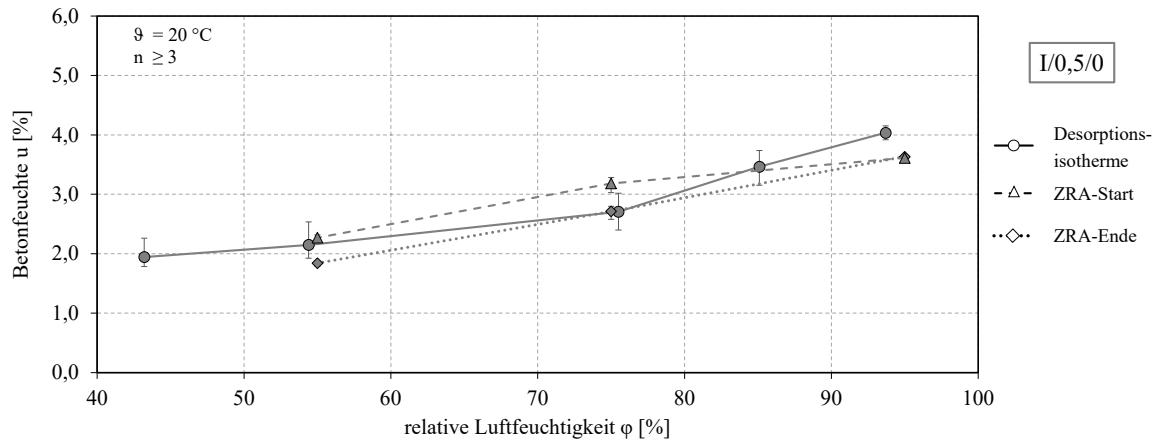


Abb. A.2 - 3: Betonfeuchte, Serie I/0,5/0; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76]; **Versuchsreihe B:** vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

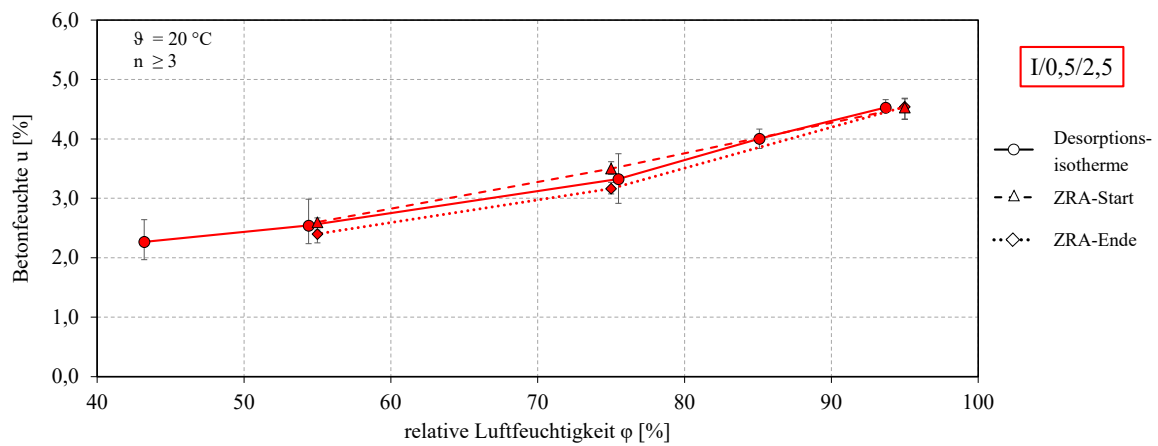


Abb. A.2 - 4: Betonfeuchte, Serie I/0,5/2,5; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76]; **Versuchsreihe B:** vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

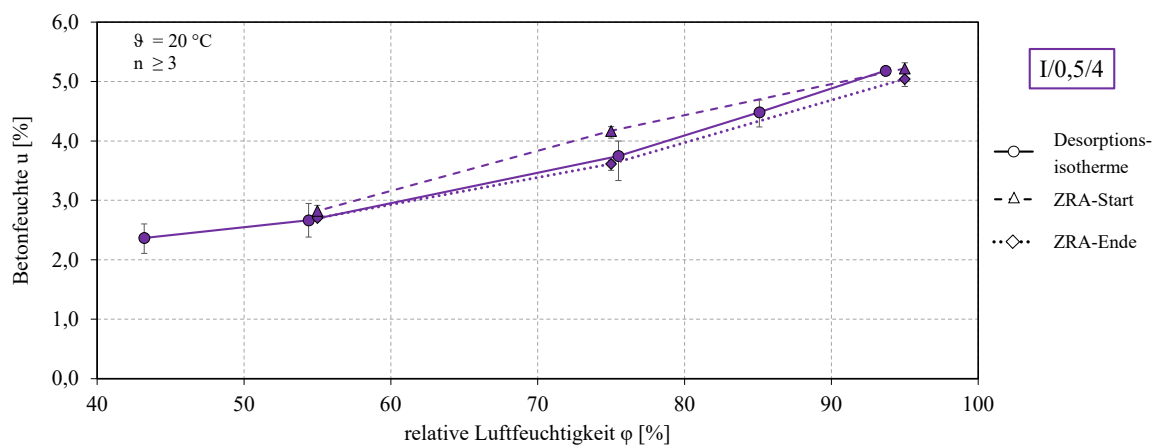


Abb. A.2 - 5: Betonfeuchte, Serie I/0,5/4; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76]; **Versuchsreihe B:** vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

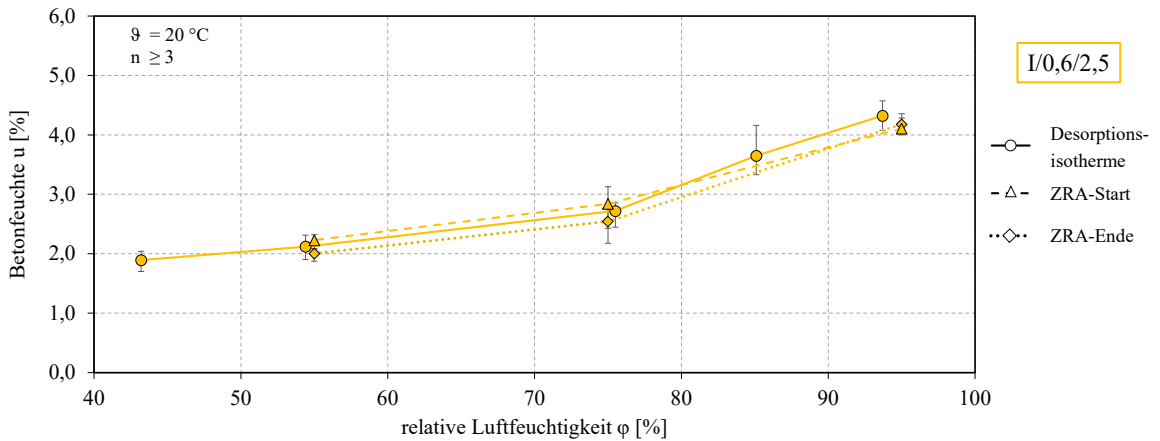


Abb. A.2 - 6: Betonfeuchte, Serie I/0,6/2,5; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76];
Versuchsreihe B: vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

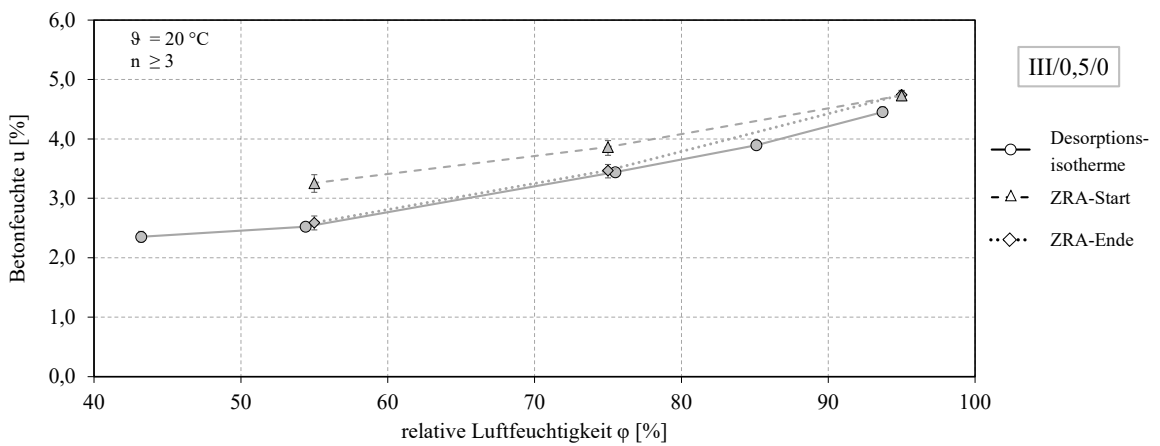


Abb. A.2 - 7: Betonfeuchte, Serie III/0,5/0; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76];
Versuchsreihe B: vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

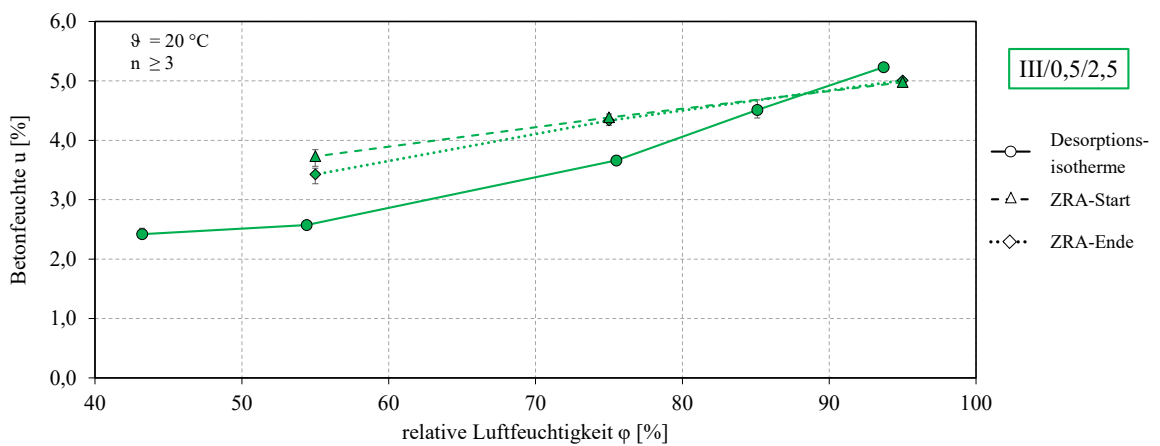


Abb. A.2 - 8: Betonfeuchte, Serie III/0,5/2,5; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76];
Versuchsreihe B: vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

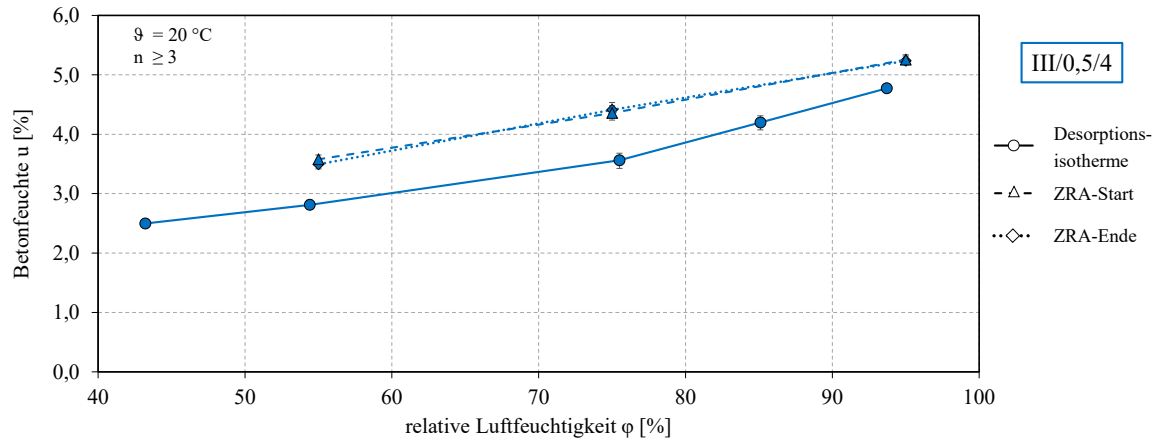


Abb. A.2 - 9: Betonfeuchte, Serie III/0,5/4; **Versuchsreihe A:** Desorptionsisotherme [76]; **Versuchsreihe B:** vor/nach Kurzschlusszyklus – Mittel-, Min- und Max-Werte

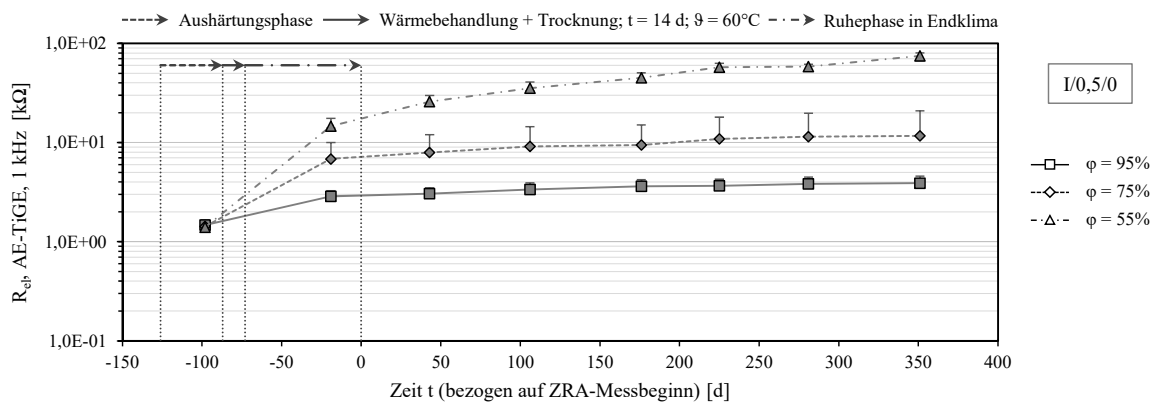


Abb. A.2 - 10: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie I/0,5/0 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1$ kHz – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

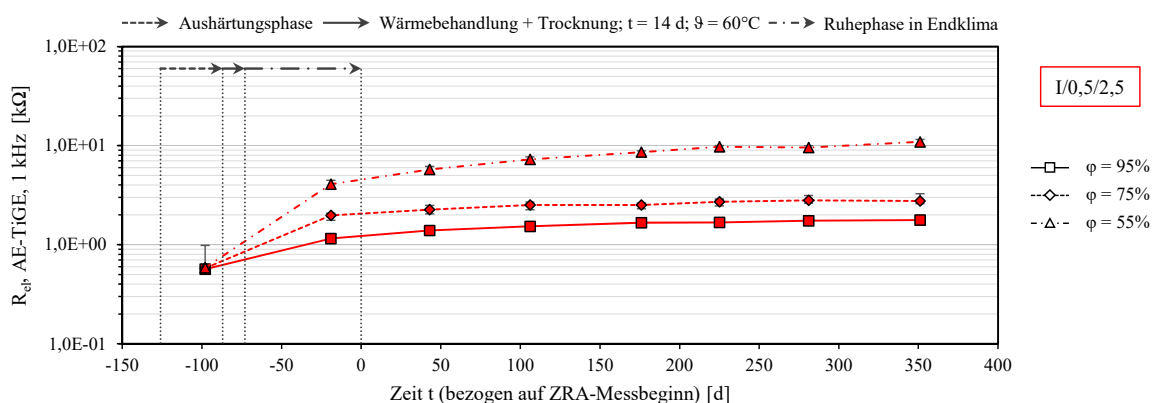


Abb. A.2 - 11: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie I/0,5/2,5 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1$ kHz – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

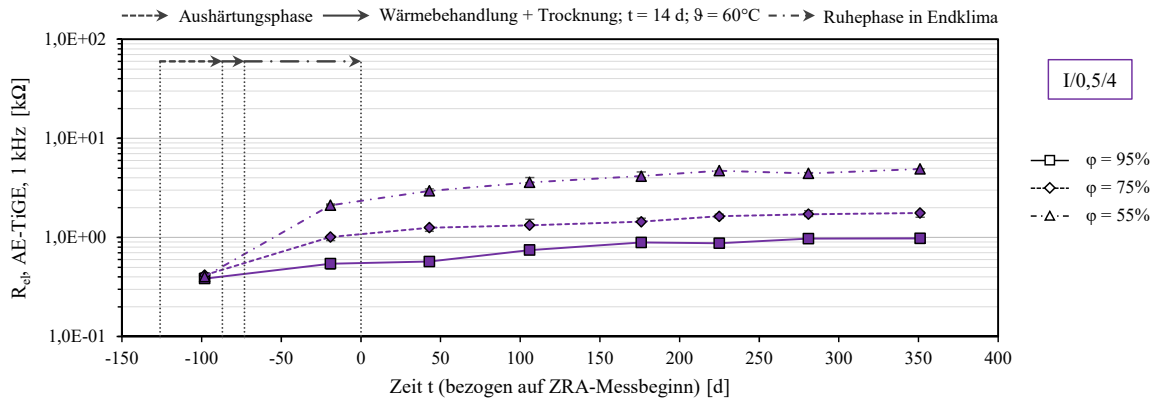


Abb. A.2 - 12: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie I/0,5/4 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1 \text{ kHz}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

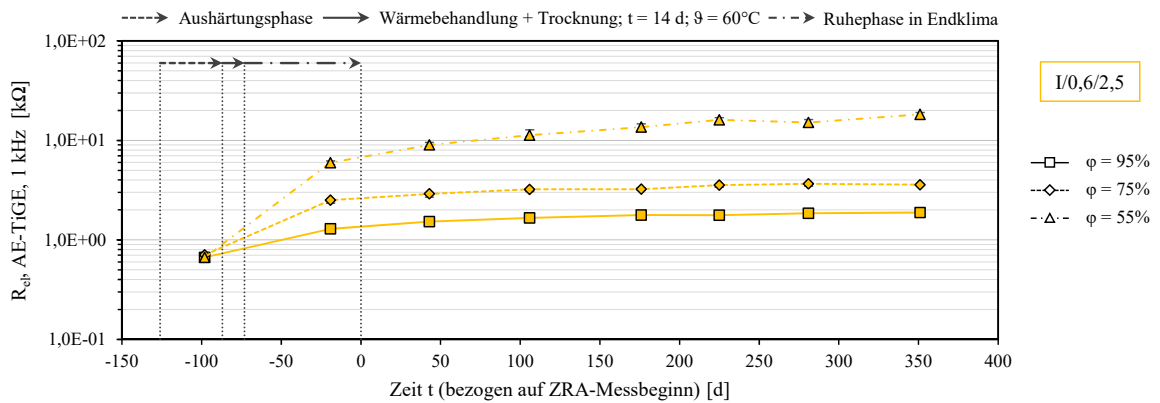


Abb. A.2 - 13: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie I/0,6/2,5 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1 \text{ kHz}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

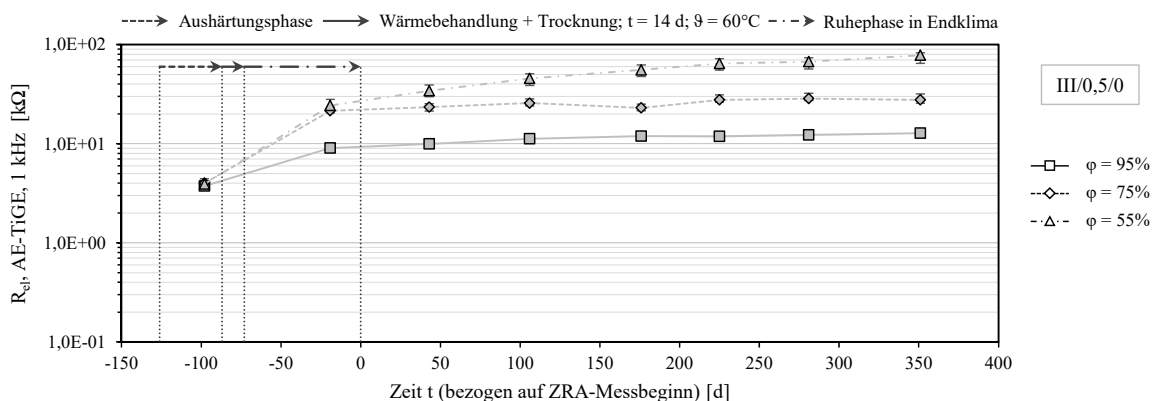


Abb. A.2 - 14: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie III/0,5/0 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1 \text{ kHz}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

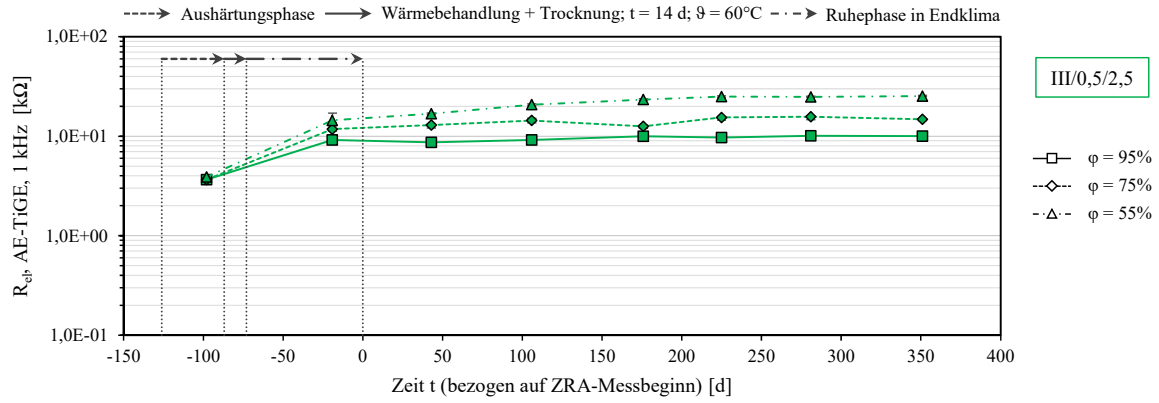


Abb. A.2 - 15: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie III/0,5/2,5 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1 \text{ kHz}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

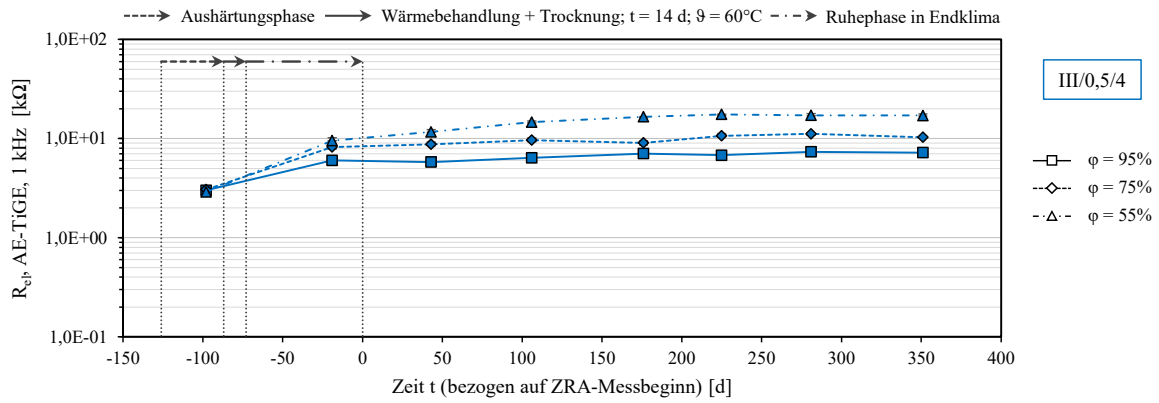


Abb. A.2 - 16: Elektrolytwiderstände R_{el} der Serie III/0,5/4 zwischen Messanode und Ti/MMO-Gegenelektrode, $f = 1 \text{ kHz}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

A.3 E_{OC} UND POLARISATIONSWIDERSTÄNDE

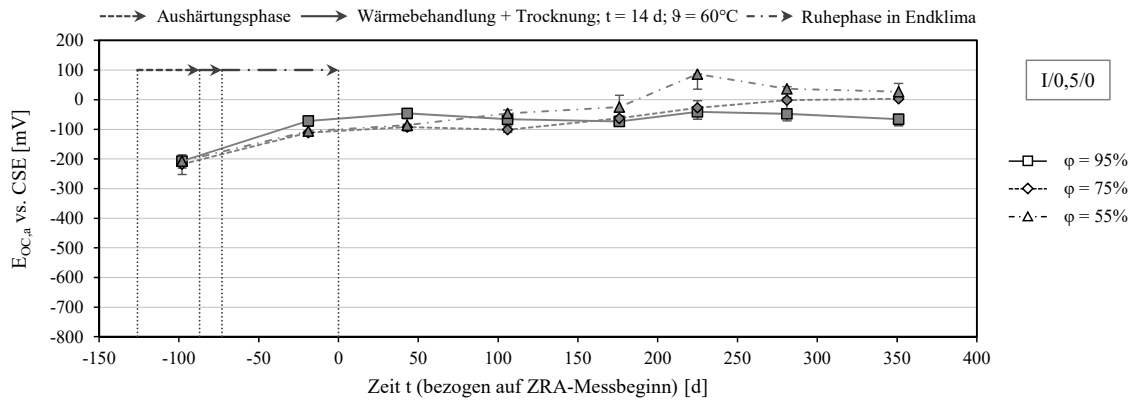


Abb. A.3 - 1: E_{OC} der Messanoden vs. CSE der Serie I/0,5/0 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

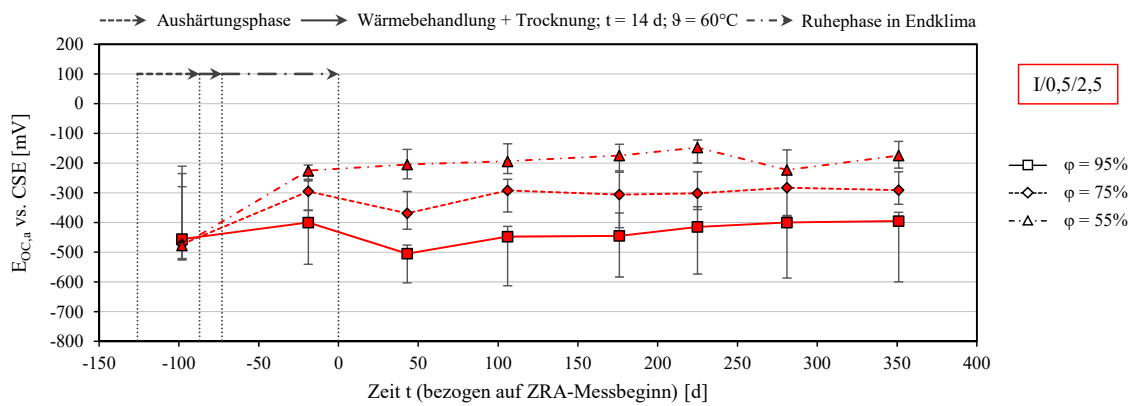


Abb. A.3 - 2: E_{OC} der Messanoden vs. CSE der Serie I/0,5/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

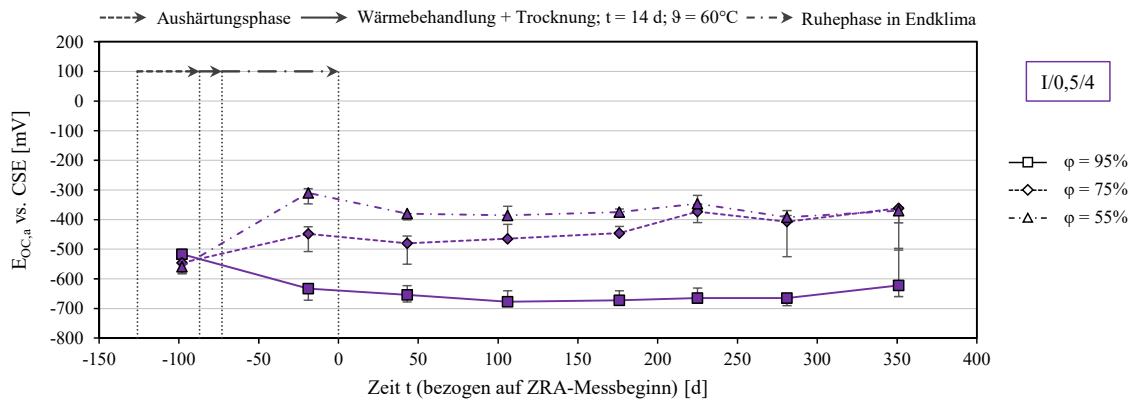


Abb. A.3 - 3: E_{OC} der Messanoden vs. CSE der Serie I/0,5/4 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

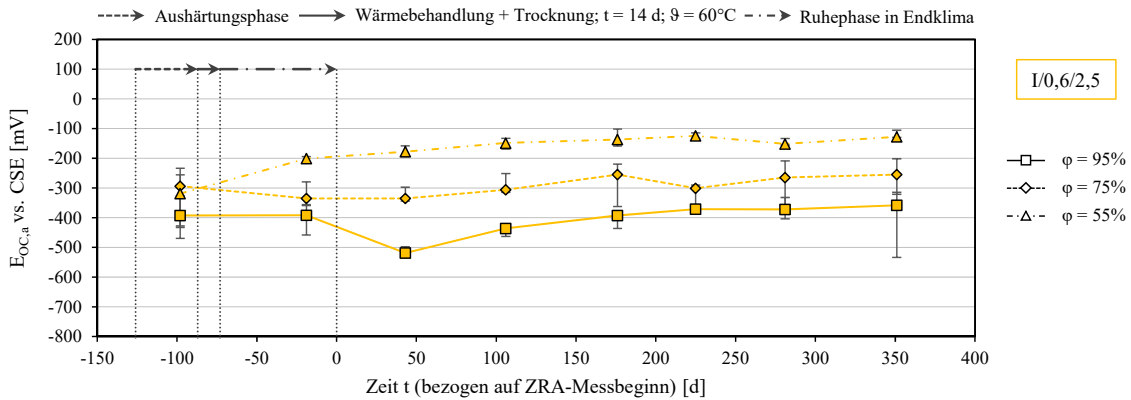


Abb. A.3 - 4: EOC der Messanoden vs. CSE der Serie I/0,6/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

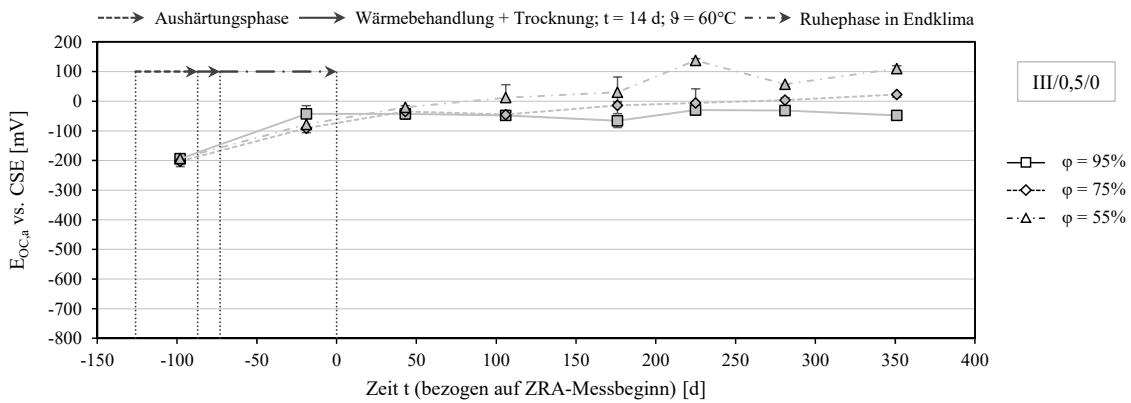


Abb. A.3 - 5: EOC der Messanoden vs. CSE der Serie III/0,5/0 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

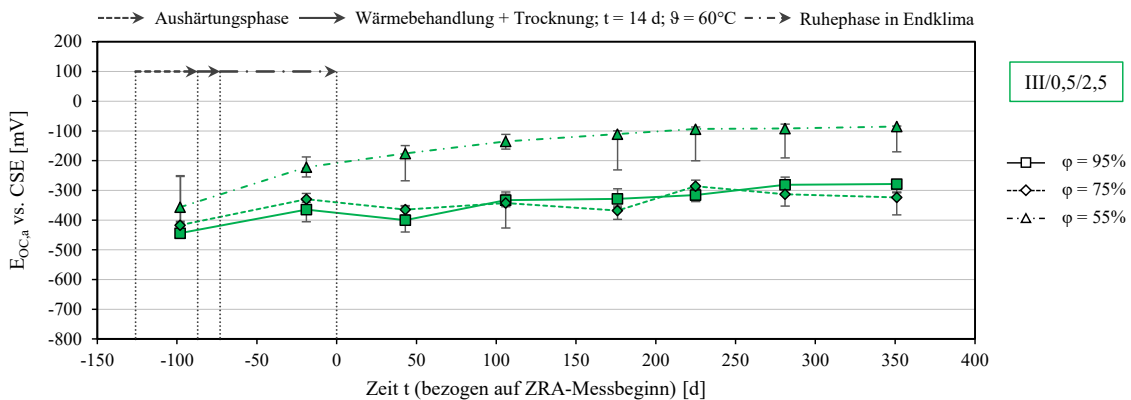


Abb. A.3 - 6: EOC der Messanoden vs. CSE der Serie III/0,5/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

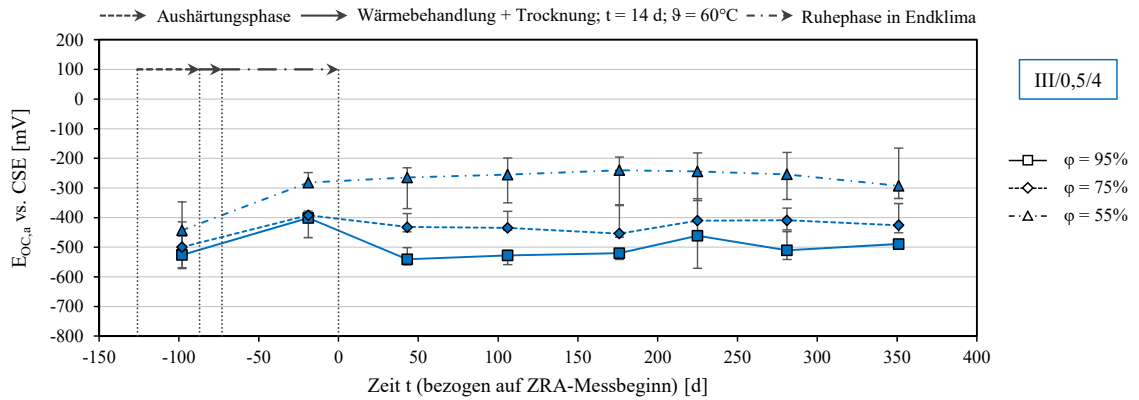


Abb. A.3 - 7: E_{OC} der Messanoden vs. CSE der Serie III/0,5/4 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

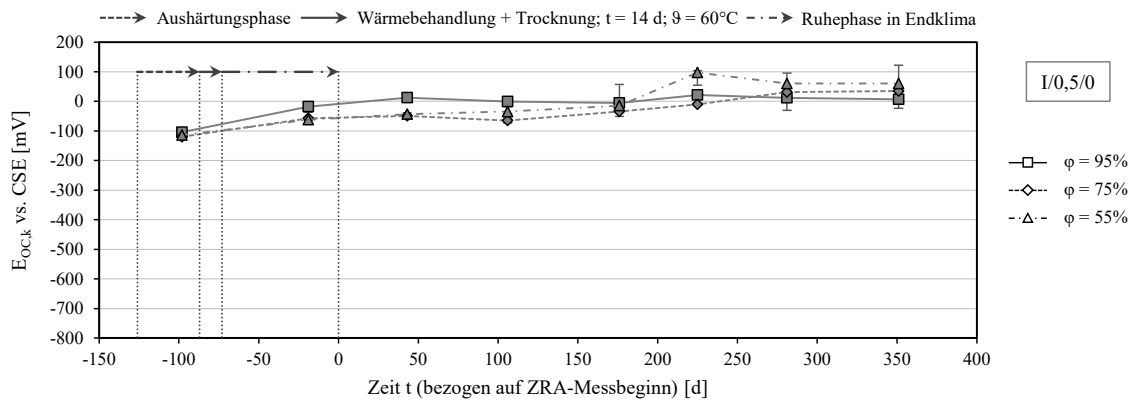


Abb. A.3 - 8: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie I/0,5/0 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

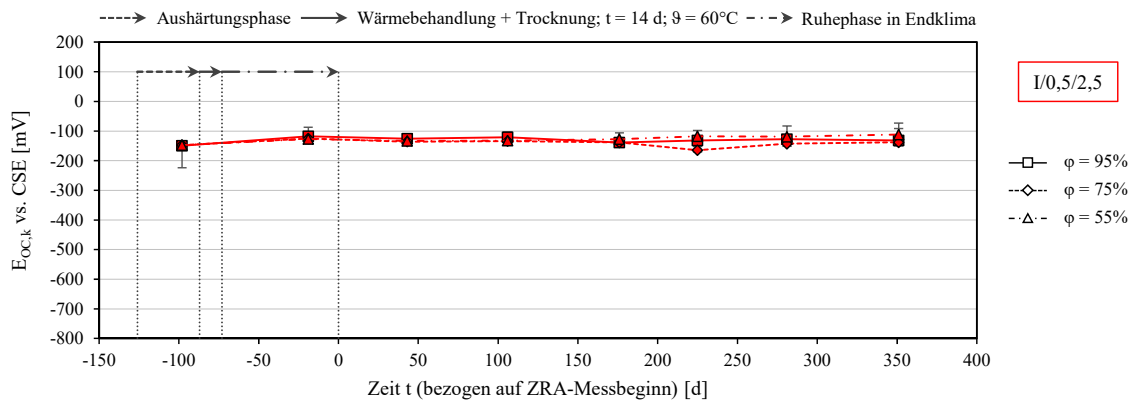


Abb. A.3 - 9: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie I/0,5/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

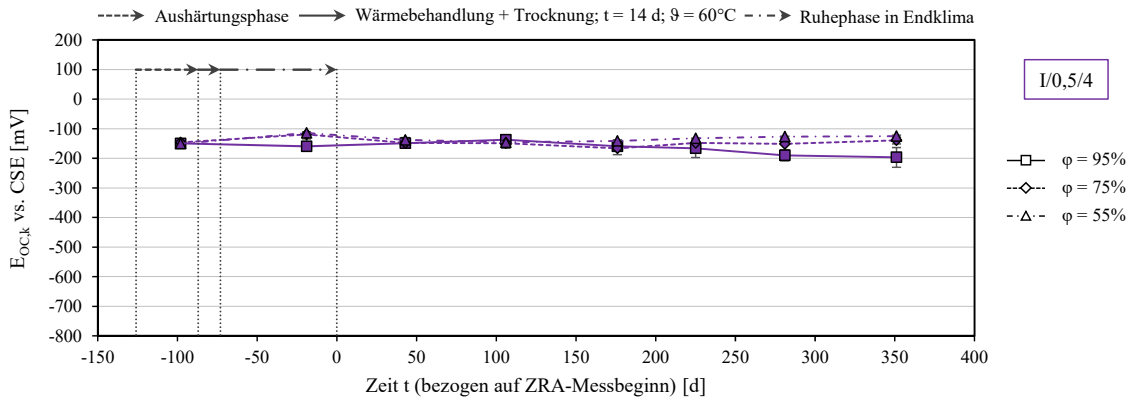


Abb. A.3 - 10: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie I/0,5/4 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

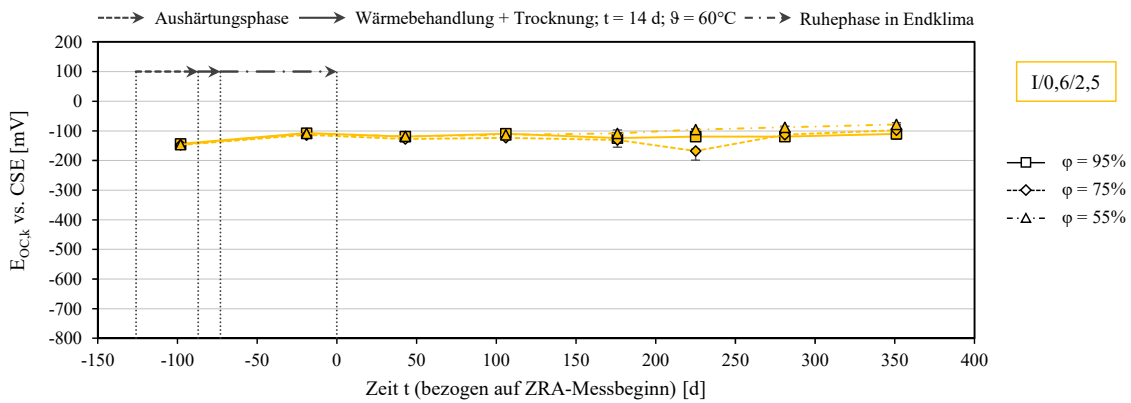


Abb. A.3 - 11: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie I/0,6/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

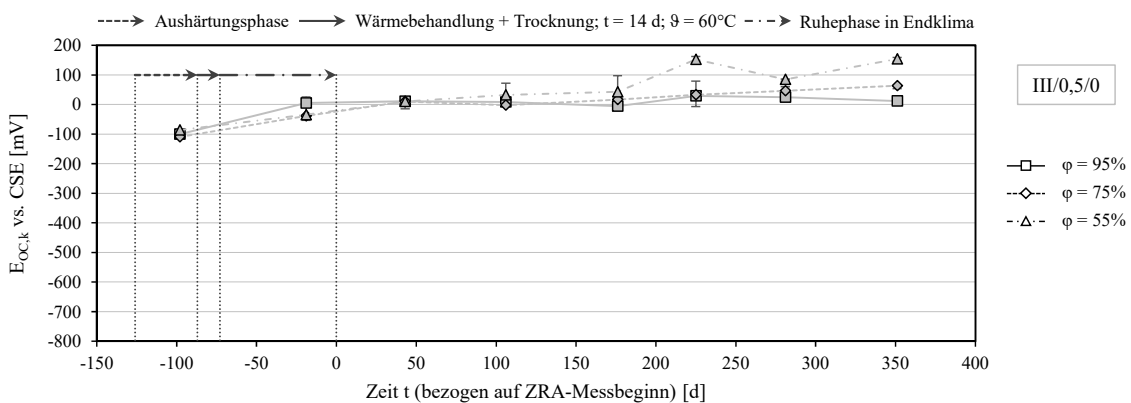


Abb. A.3 - 12: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie III/0,5/0 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

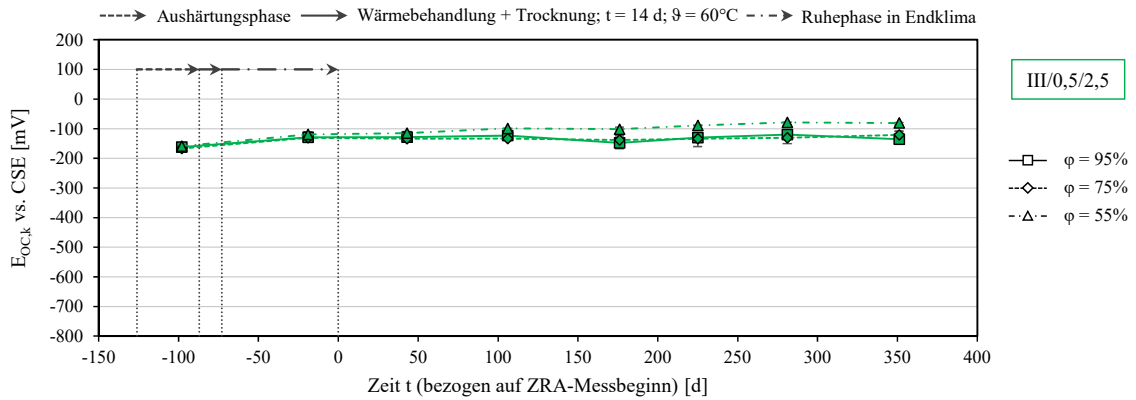


Abb. A.3 - 13: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie III/0,5/2,5 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

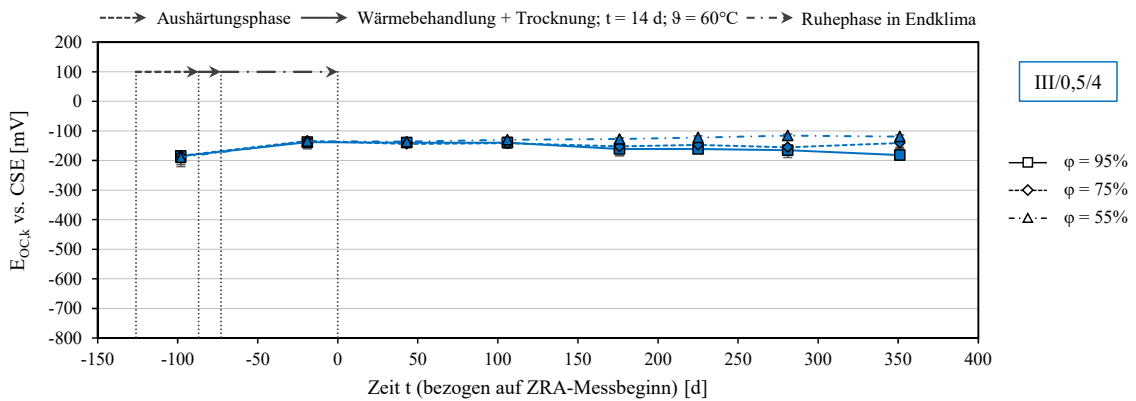


Abb. A.3 - 14: E_{OC} der Messkathoden vs. CSE der Serie III/0,5/4 – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

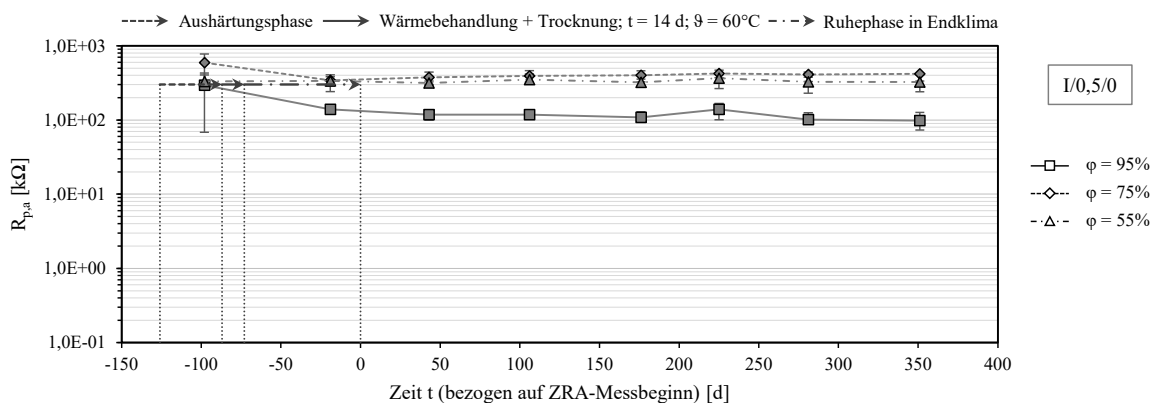


Abb. A.3 - 15: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie I/0,5/0 ± 10 mV vs. E_{OC,a} – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

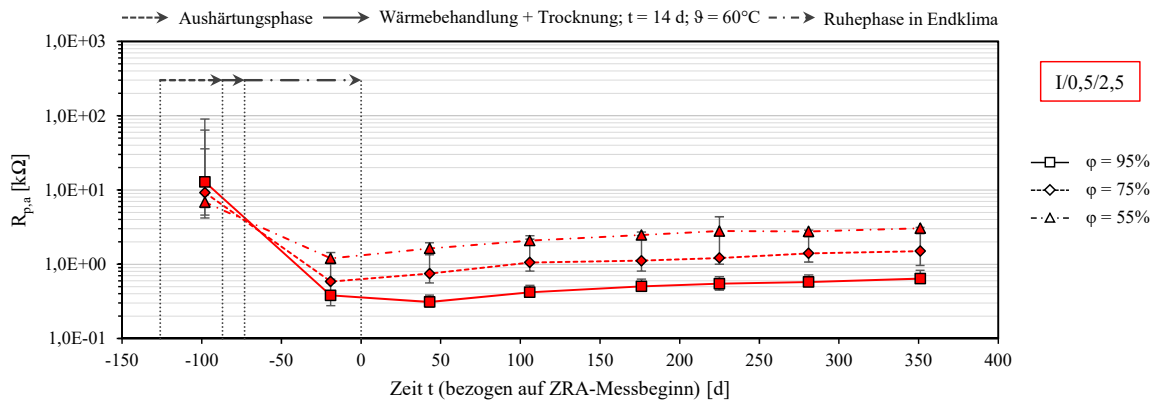


Abb. A.3 - 16: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie I/0,5/2,5 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

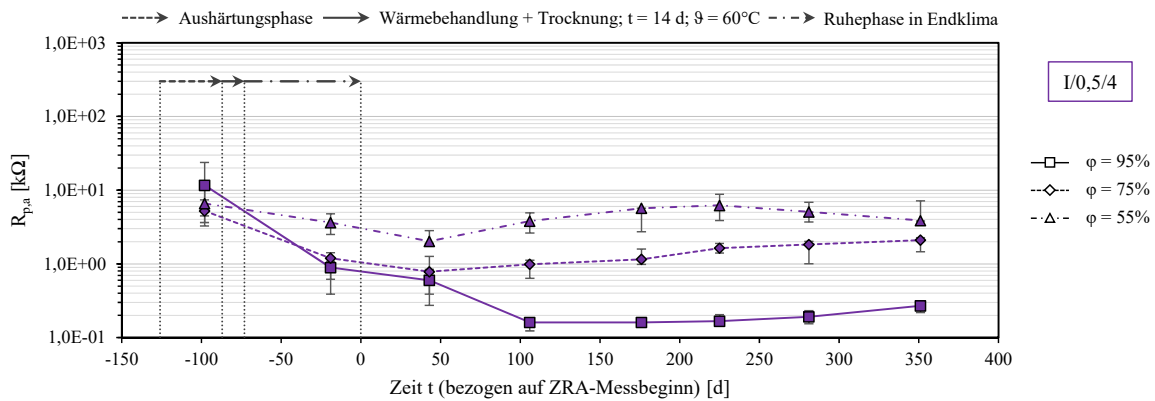


Abb. A.3 - 17: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie I/0,5/4 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

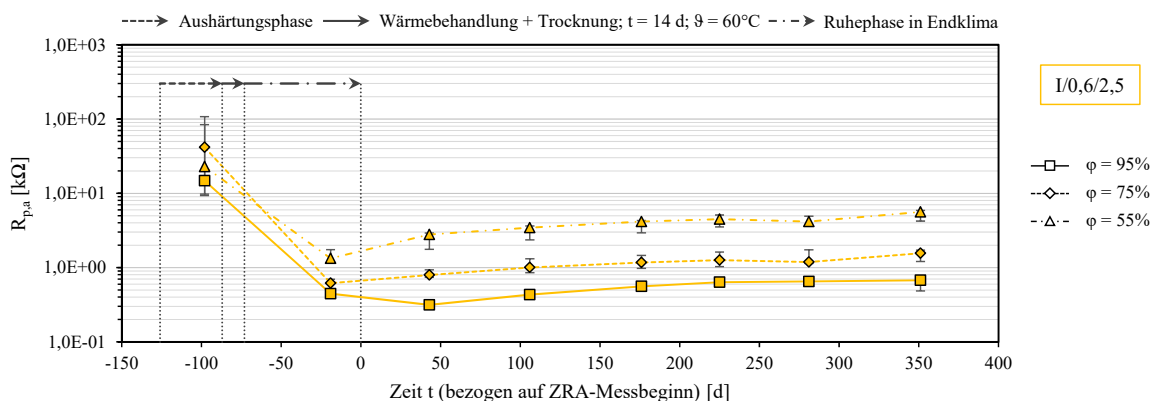


Abb. A.3 - 18: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie I/0,6/2,5 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

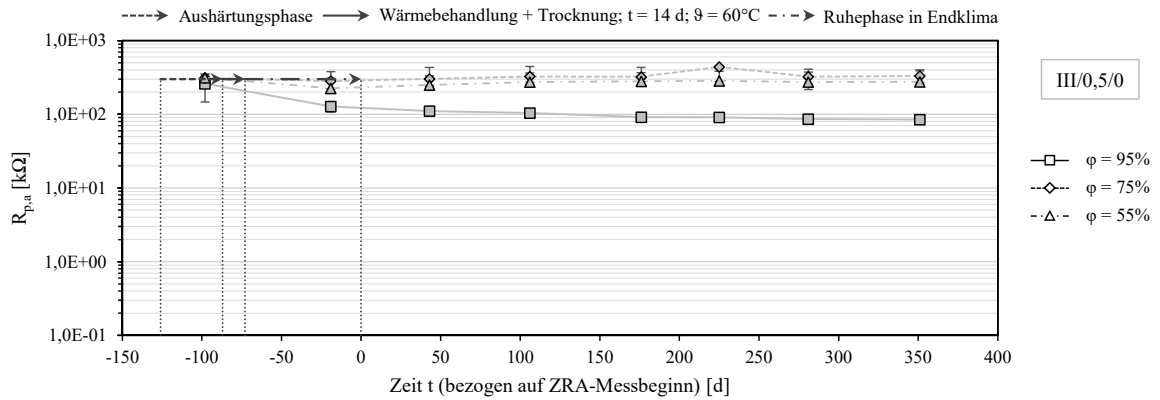


Abb. A.3 - 19: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie III/0,5/0 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

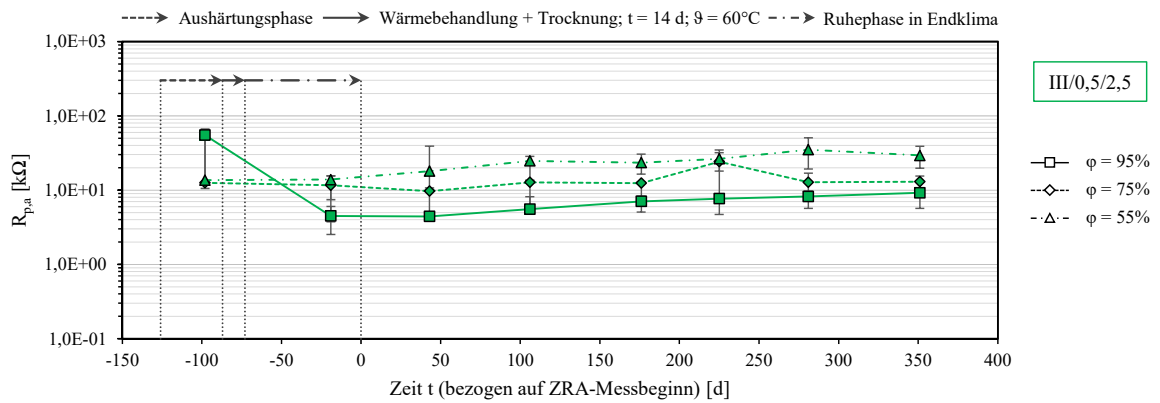


Abb. A.3 - 20: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie III/0,5/2,5 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

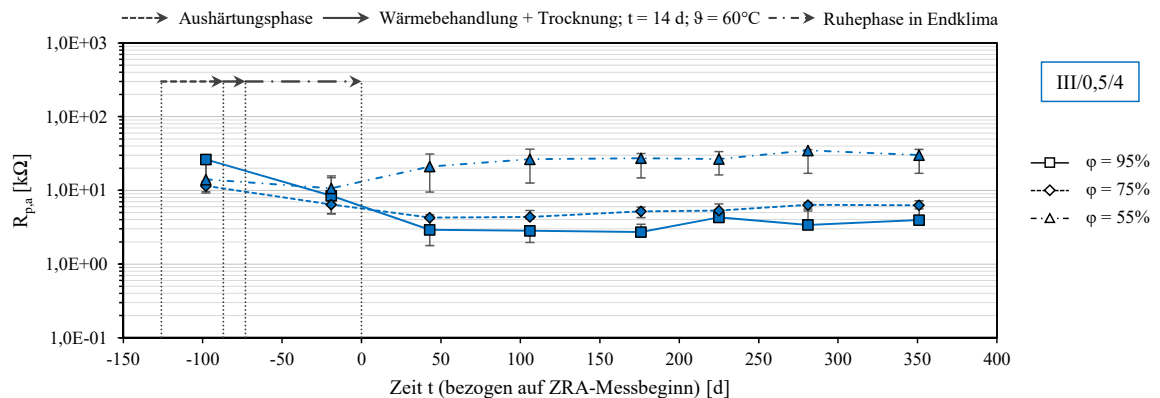


Abb. A.3 - 21: Polarisationswiderstände $R_{p,a}$ der Serie III/0,5/4 ± 10 mV vs. $E_{OC,a}$ – Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

A.4 ELEMENTSTRÖME UND MASSEVERLUSTE

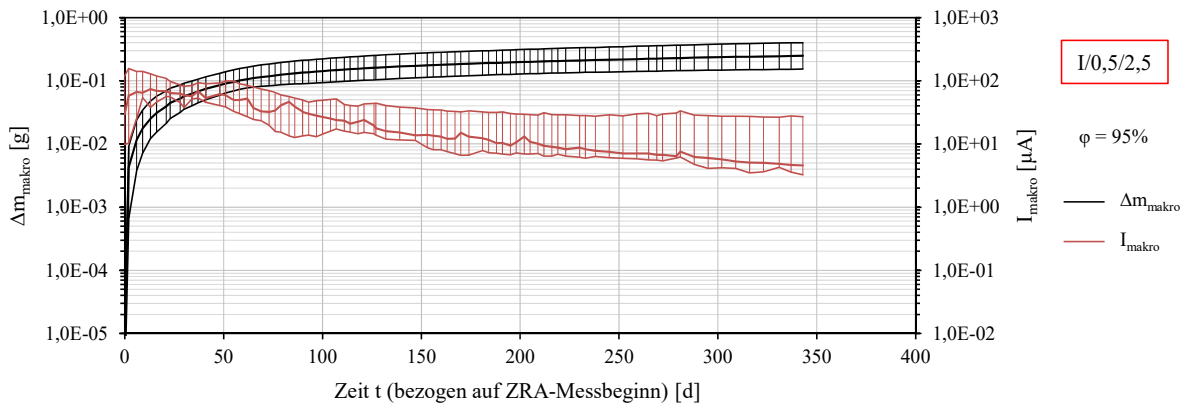


Abb. A.4 - 1: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

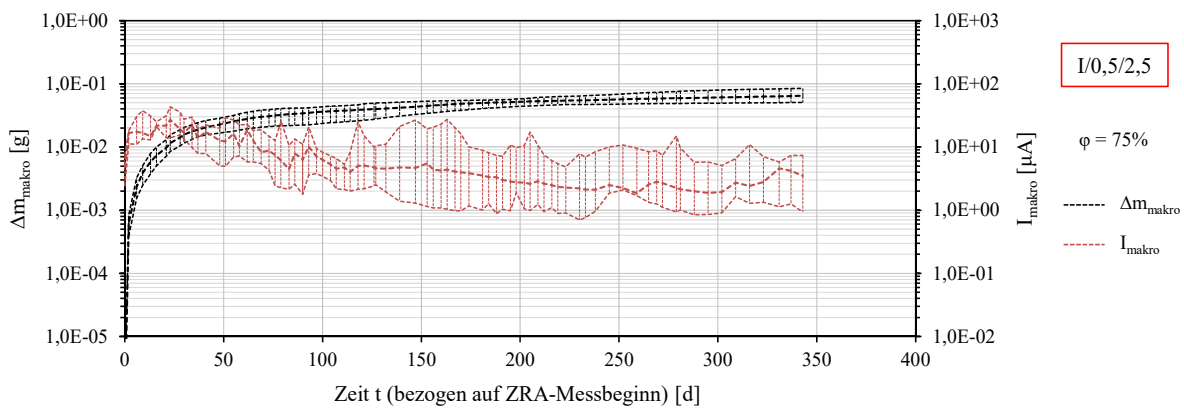


Abb. A.4 - 2: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

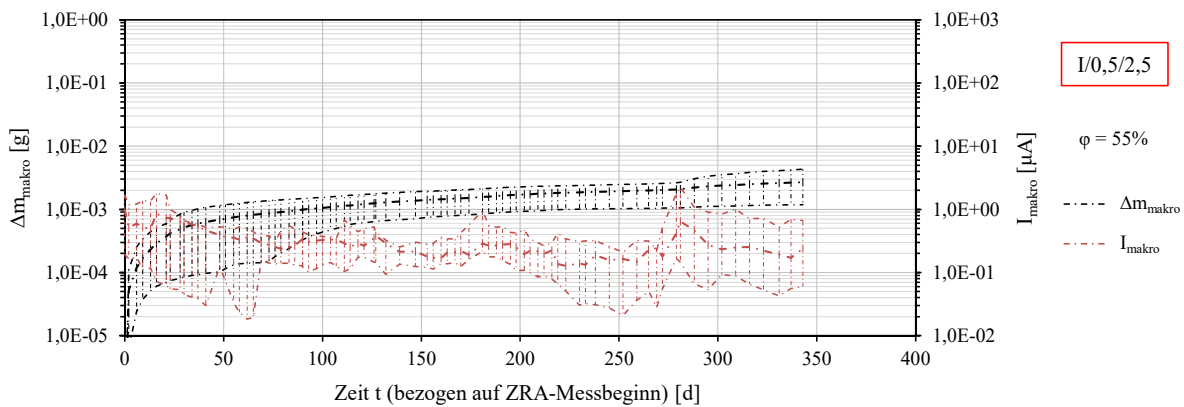


Abb. A.4 - 3: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

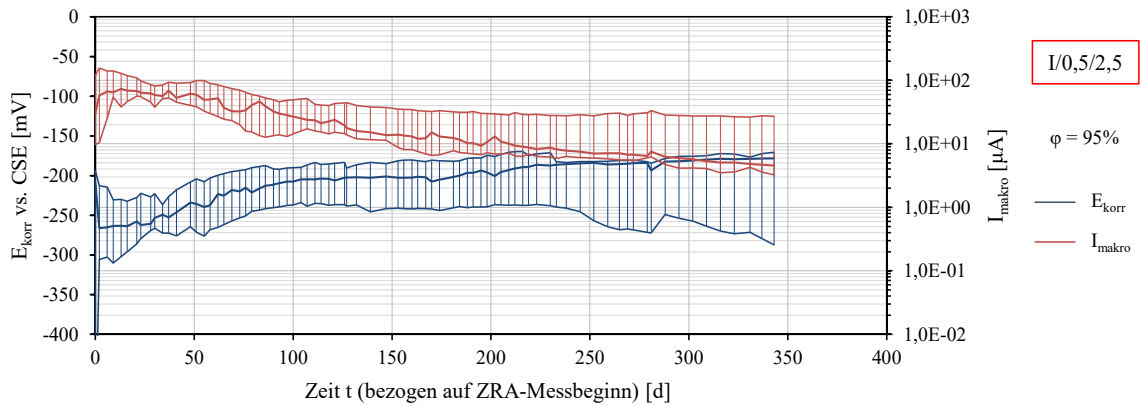


Abb. A.4 - 4: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\varphi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

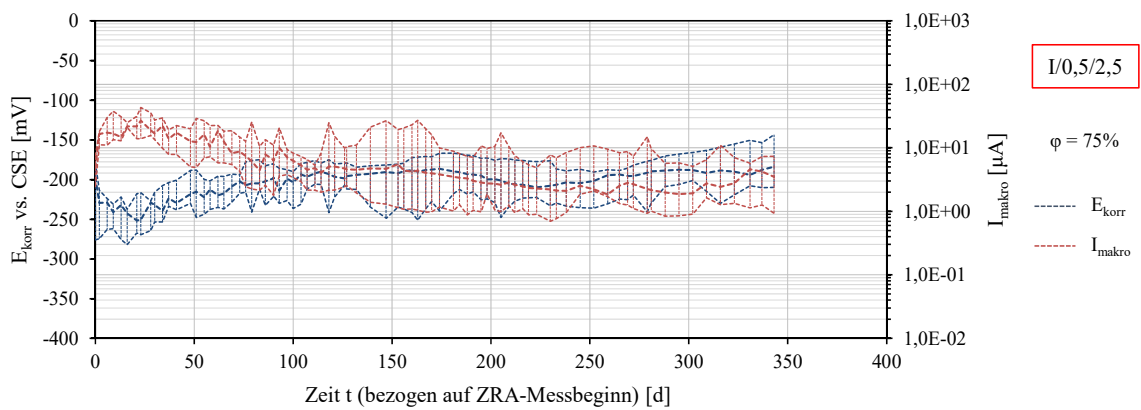


Abb. A.4 - 5: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\varphi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

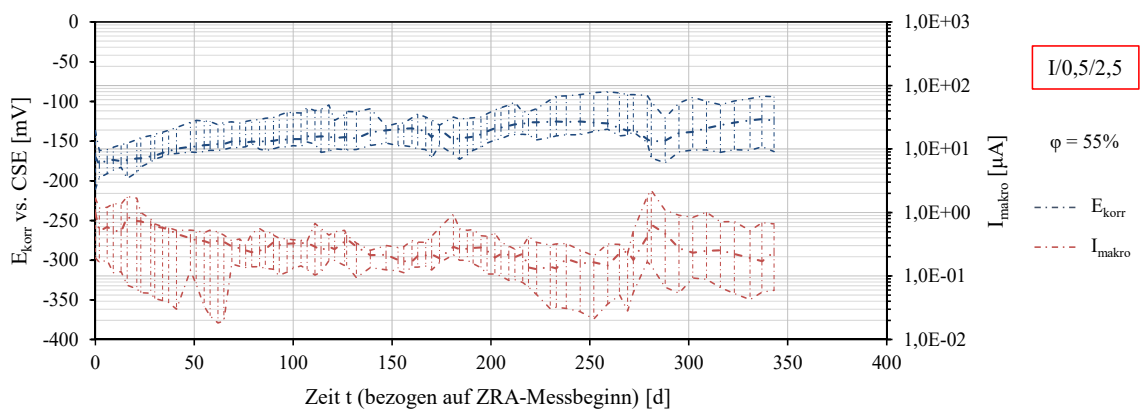


Abb. A.4 - 6: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/2,5; $\varphi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

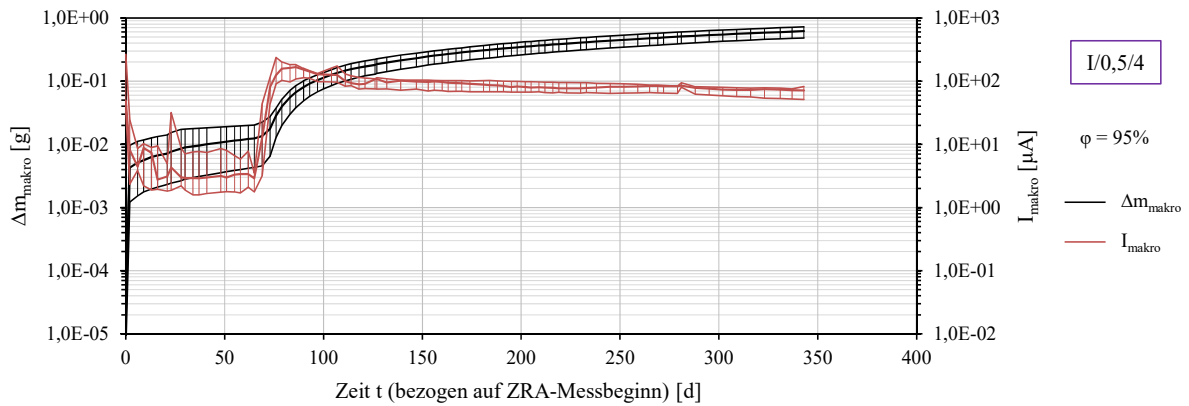


Abb. A.4 - 7: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/4; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

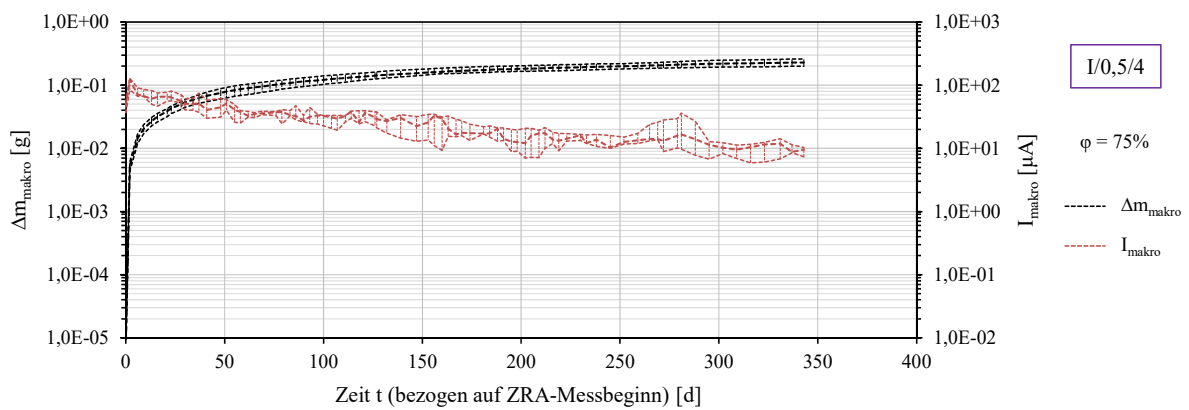


Abb. A.4 - 8: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/4; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

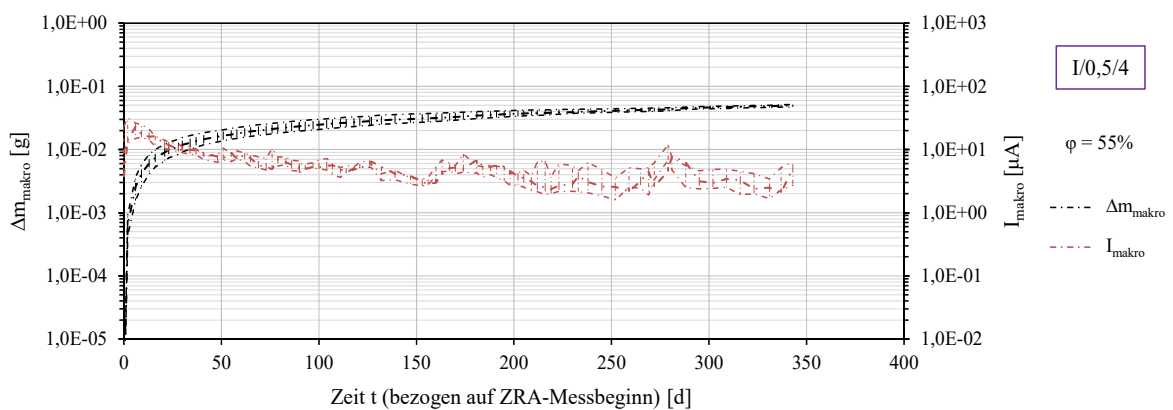


Abb. A.4 - 9: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/4; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

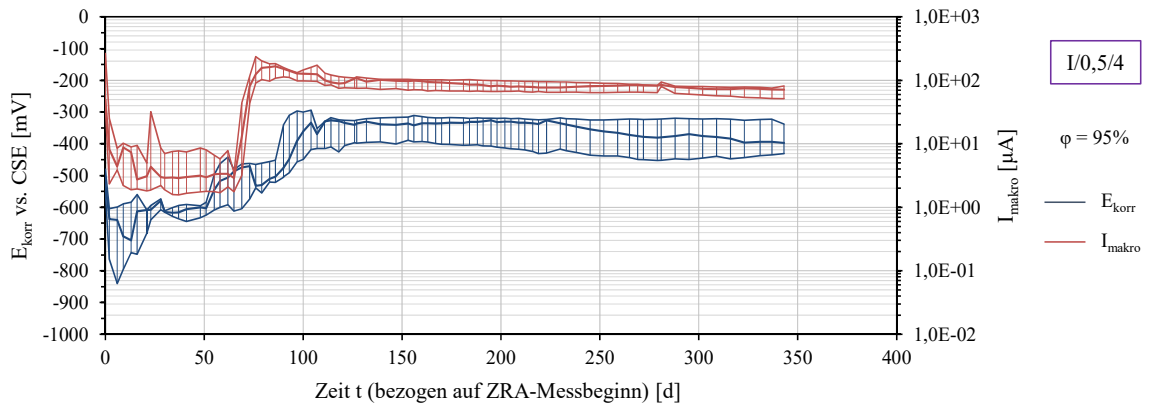


Abb. A.4 - 10: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/4; $\varphi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

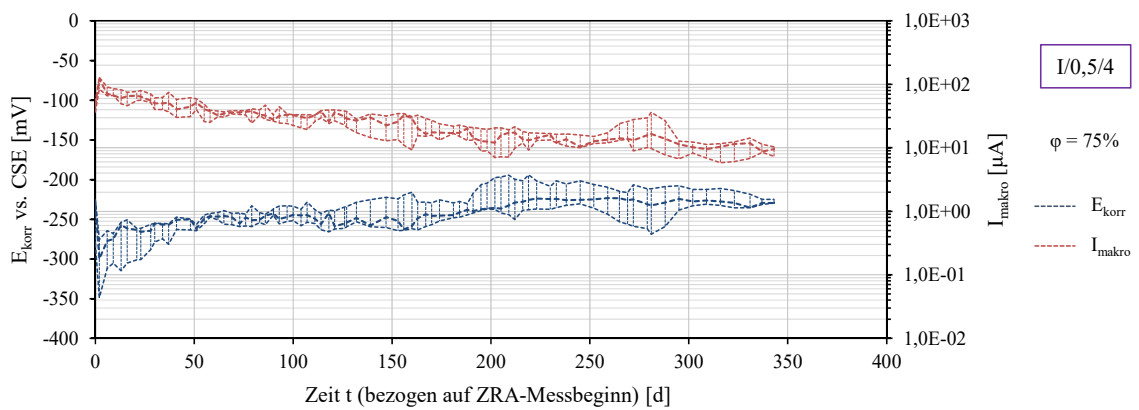


Abb. A.4 - 11: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/4; $\varphi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

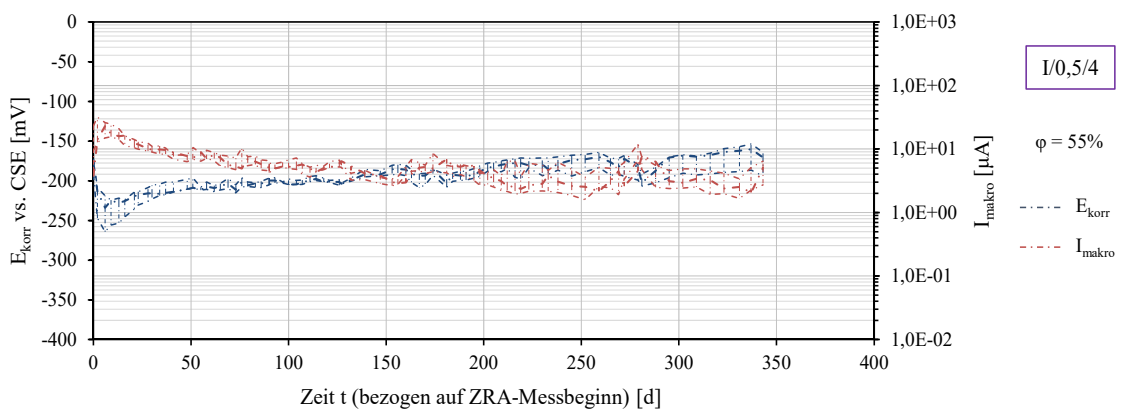


Abb. A.4 - 12: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,5/4; $\varphi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

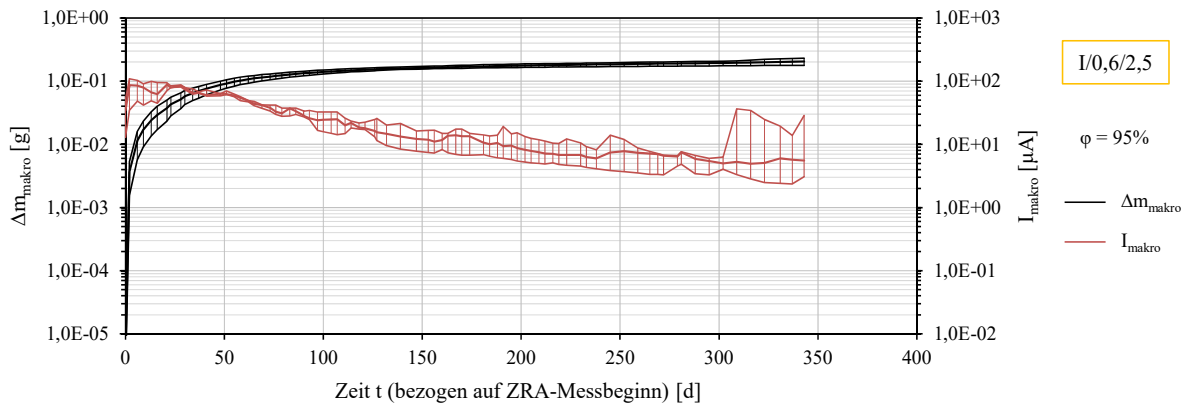


Abb. A.4 - 13: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,6/2,5; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

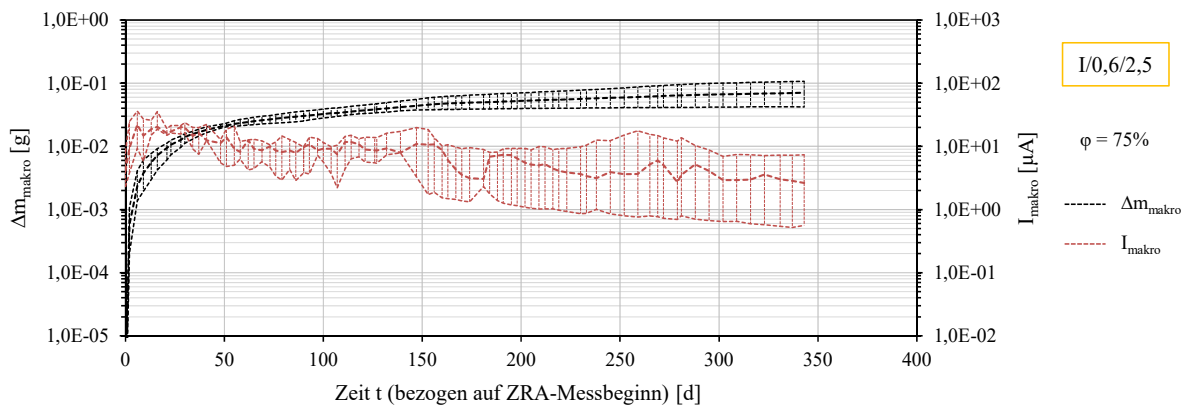


Abb. A.4 - 14: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,6/2,5; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

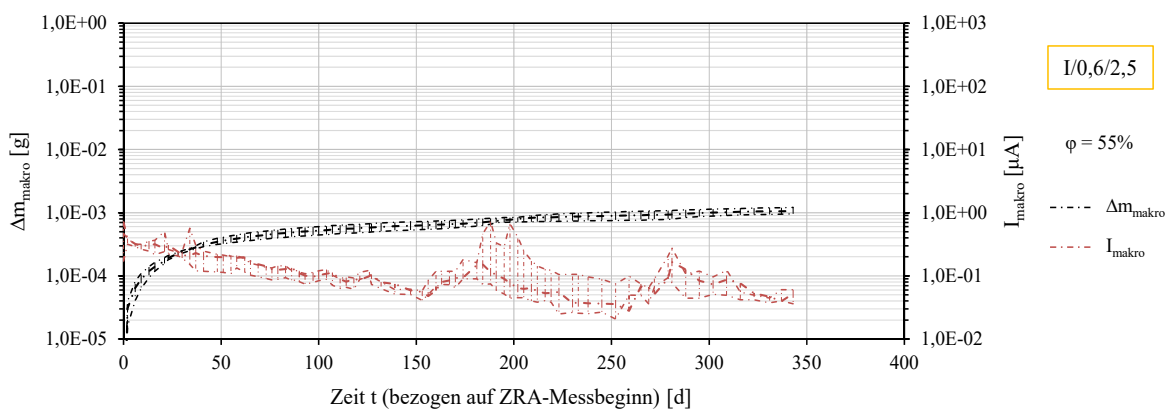


Abb. A.4 - 15: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,6/2,5; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

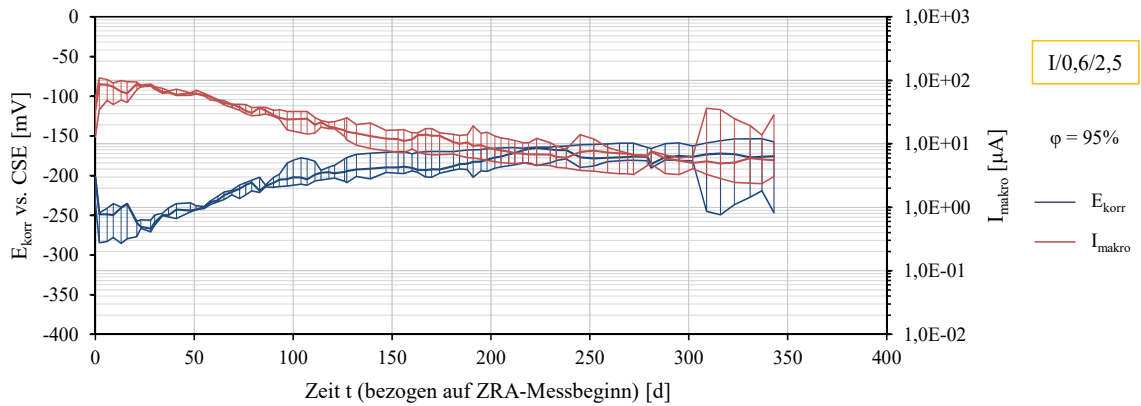


Abb. A.4 - 16: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,6/2,5; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

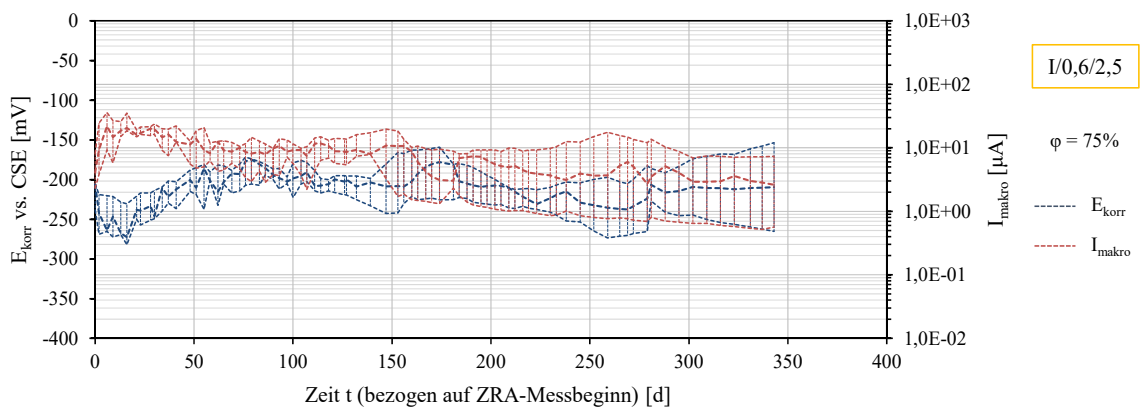


Abb. A.4 - 17: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,6/2,5; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

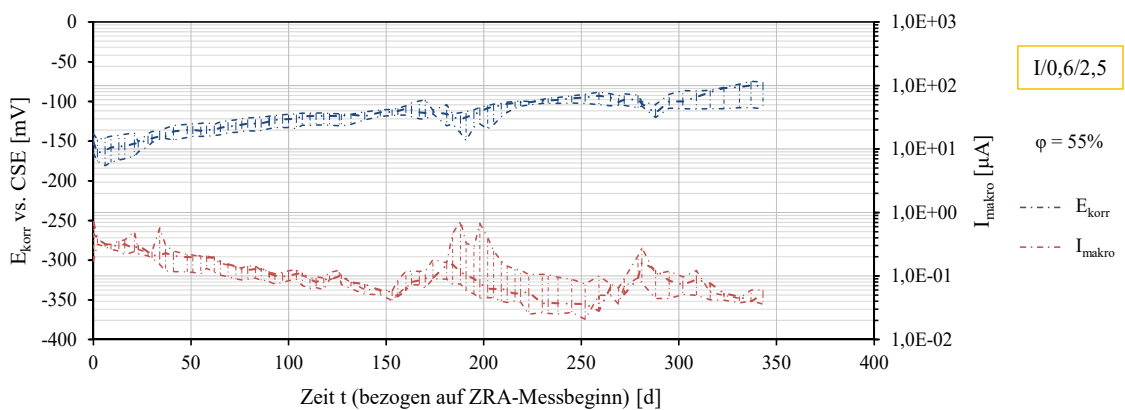


Abb. A.4 - 18: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie I/0,6/2,5; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte; **Versuchsreihe B**

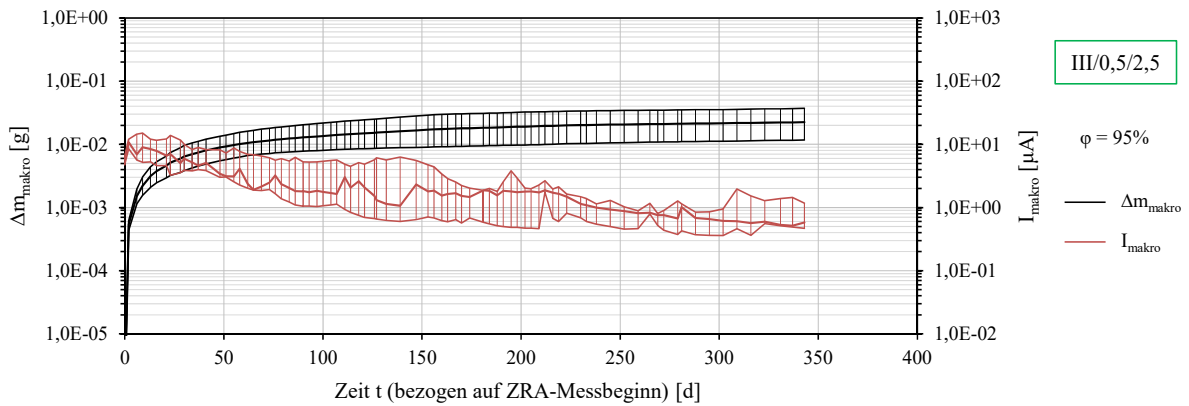


Abb. A.4 - 19: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/2,5; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

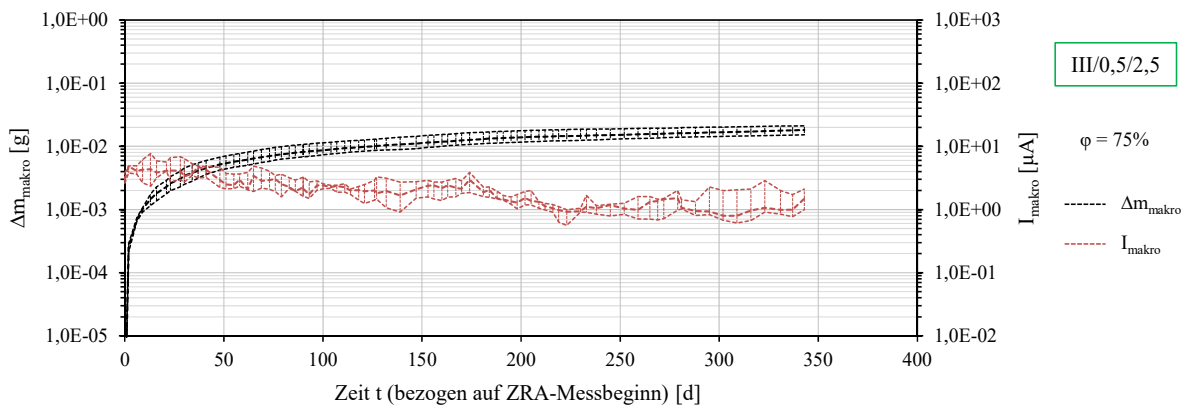


Abb. A.4 - 20: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/2,5; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

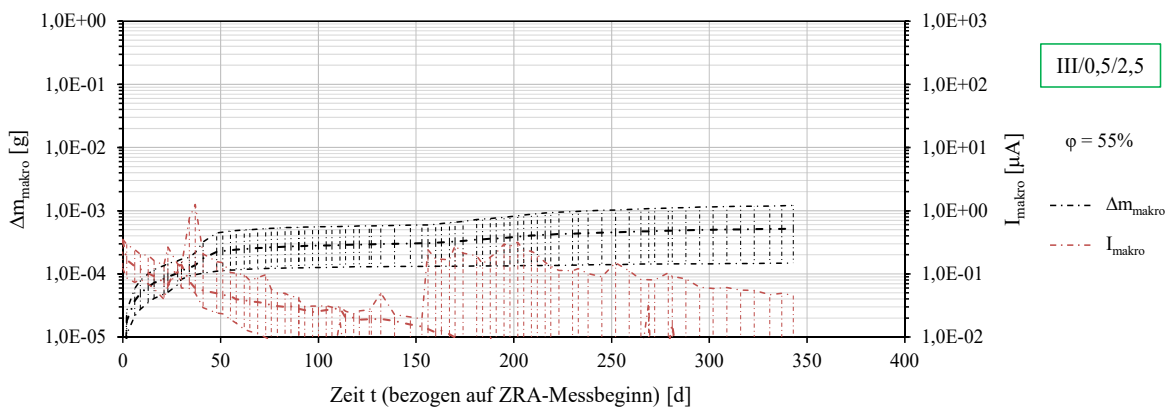


Abb. A.4 - 21: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/2,5; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

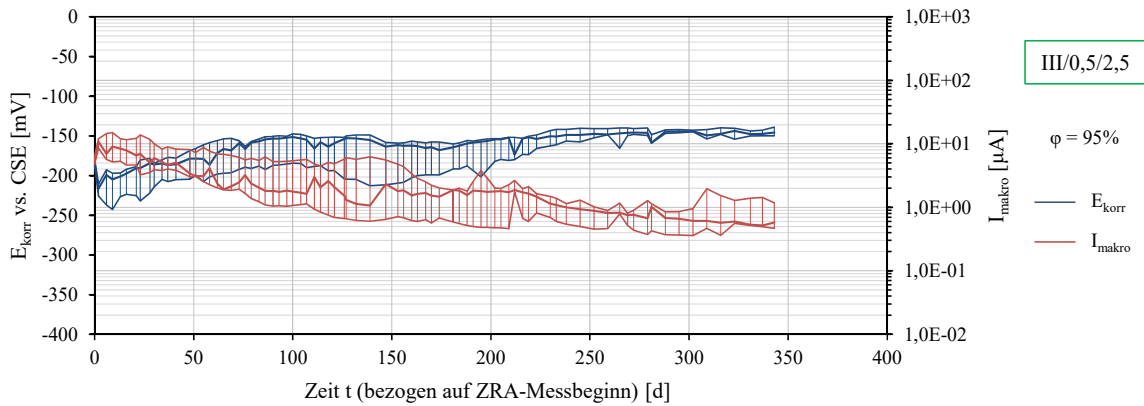


Abb. A.4 - 22: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/2,5; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

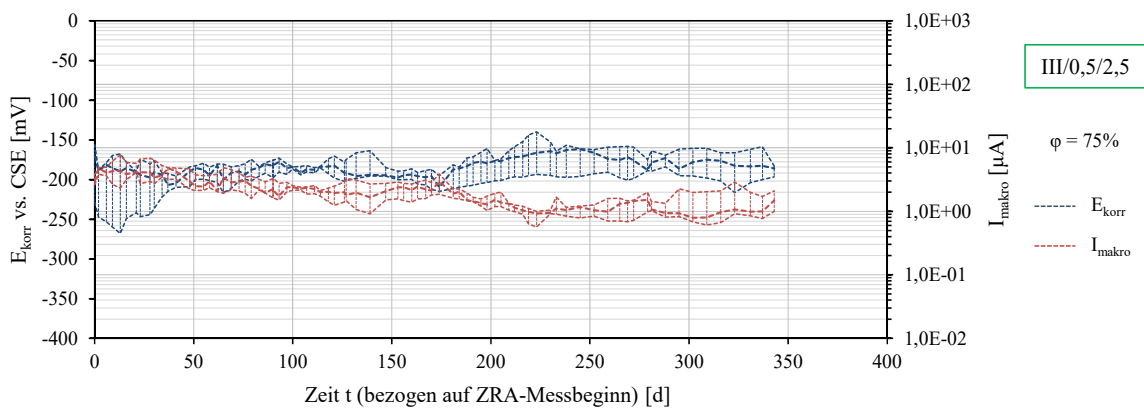


Abb. A.4 - 23: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/2,5; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

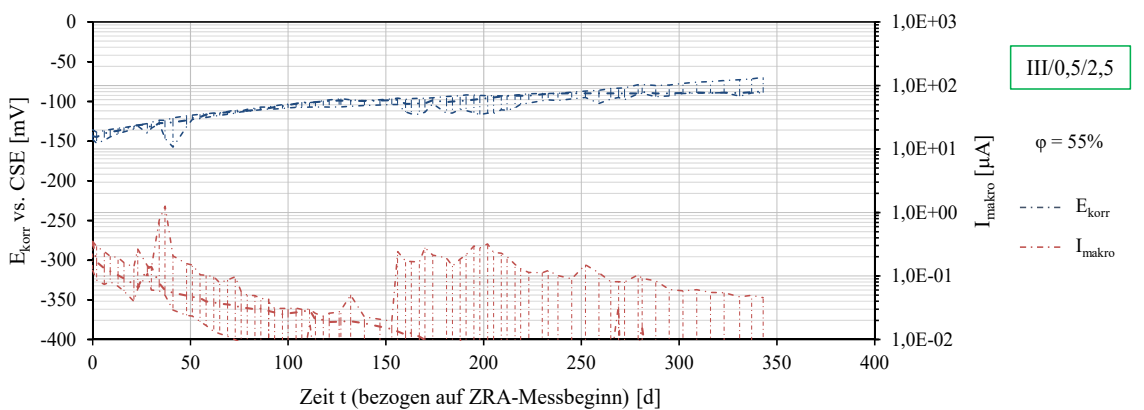


Abb. A.4 - 24: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/2,5; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

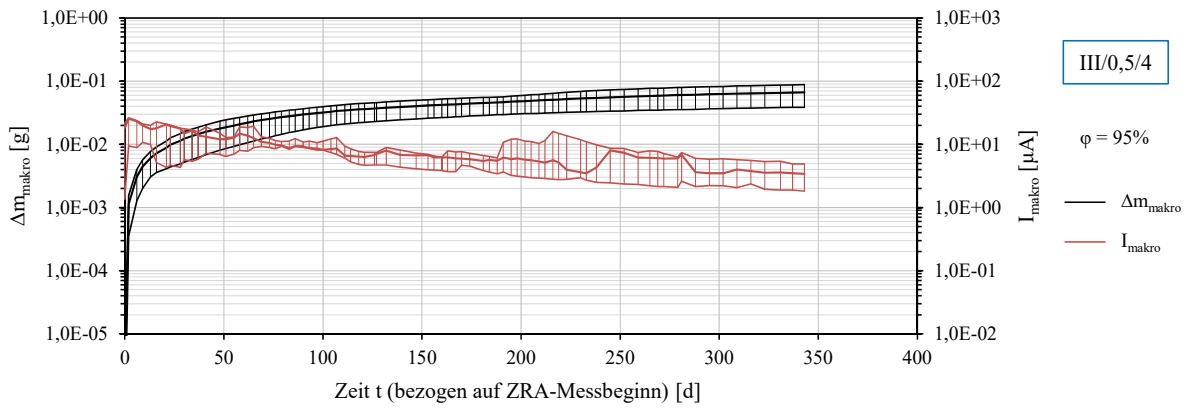


Abb. A.4 - 25: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/4; $\phi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

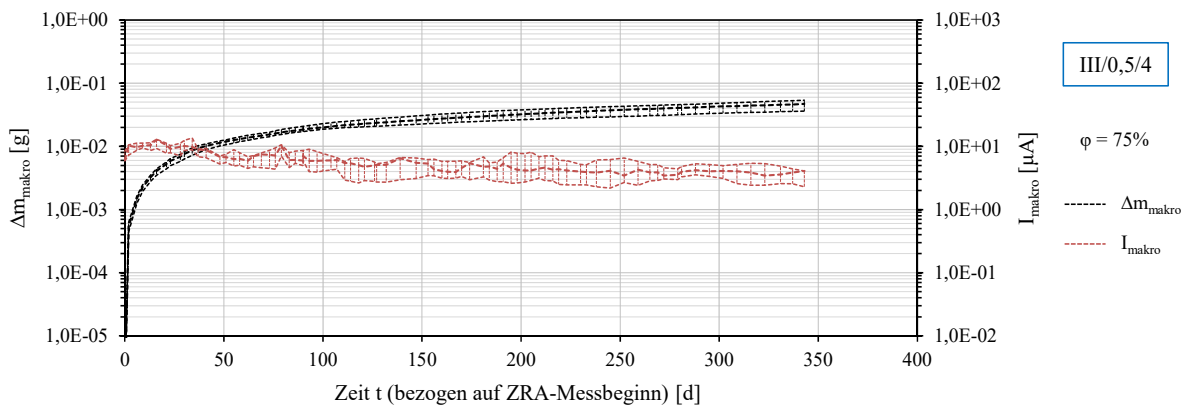


Abb. A.4 - 26: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/4; $\phi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

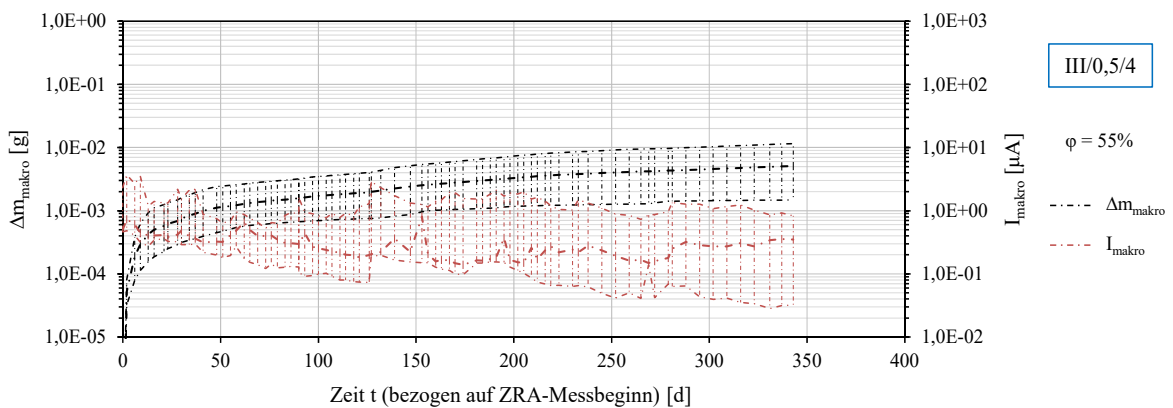


Abb. A.4 - 27: Elektrochemisch ermittelte Masseverluste Δm_{makro} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/4; $\phi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

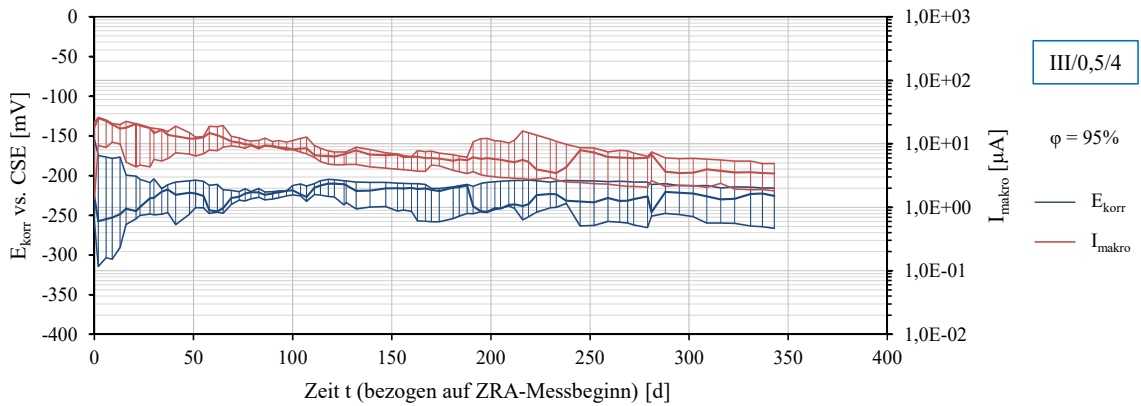


Abb. A.4 - 28: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/4; $\varphi = 95\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

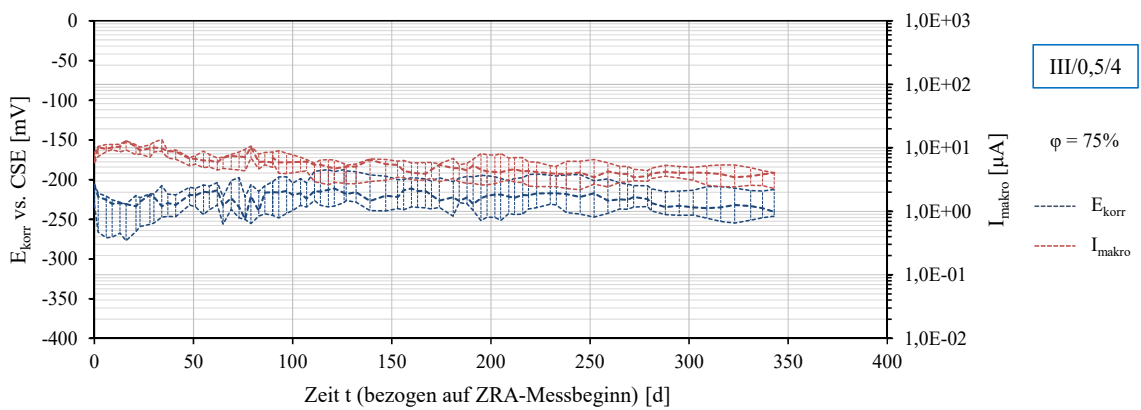


Abb. A.4 - 29: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/4; $\varphi = 75\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

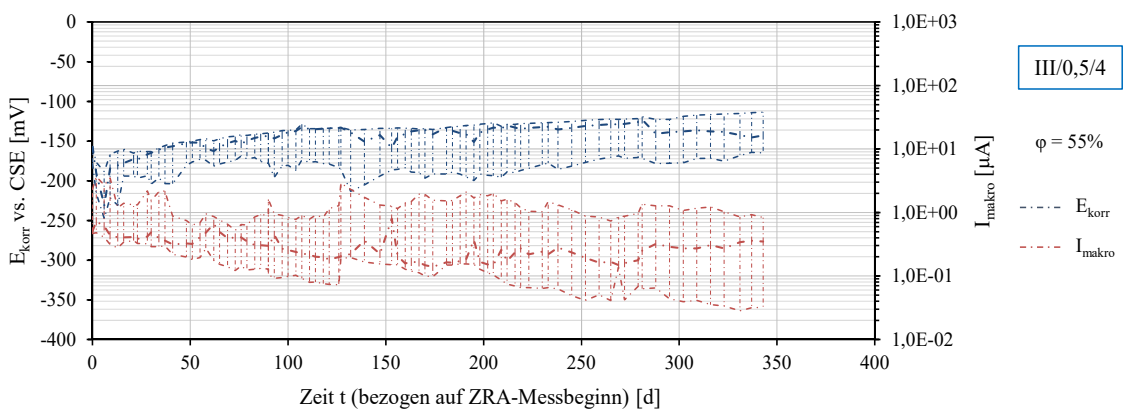


Abb. A.4 - 30: Korrosionspotentiale E_{korr} und Makroelementströme I_{makro} der Serie III/0,5/4; $\varphi = 55\%$; Mediane, Min- und Max-Werte – **Versuchsreihe B**

A.5 STROM-POTENTIALKURVEN

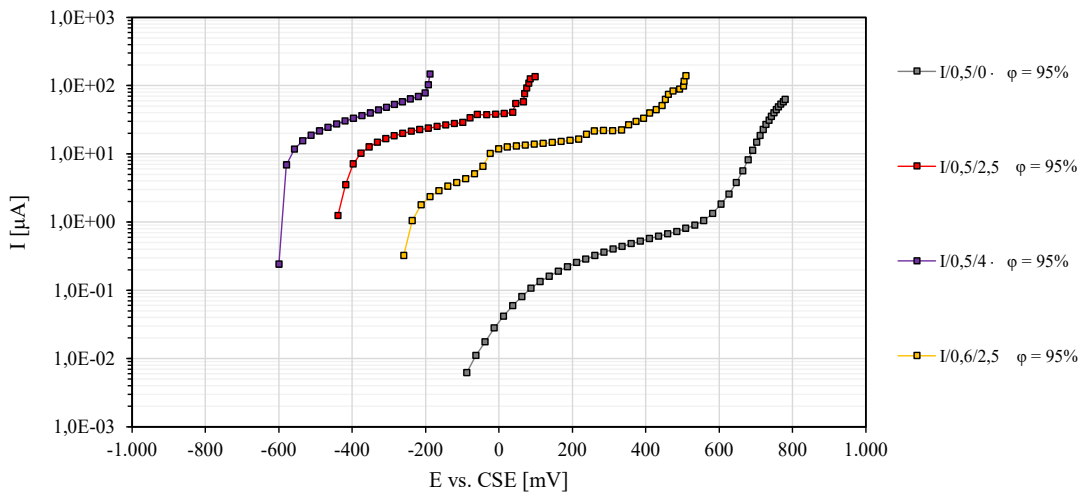


Abb. A.5 - 1: Anodische SPK der Messanoden der CEM I-Betone; $\varphi = 95\%$ – **Versuchsreihe B**

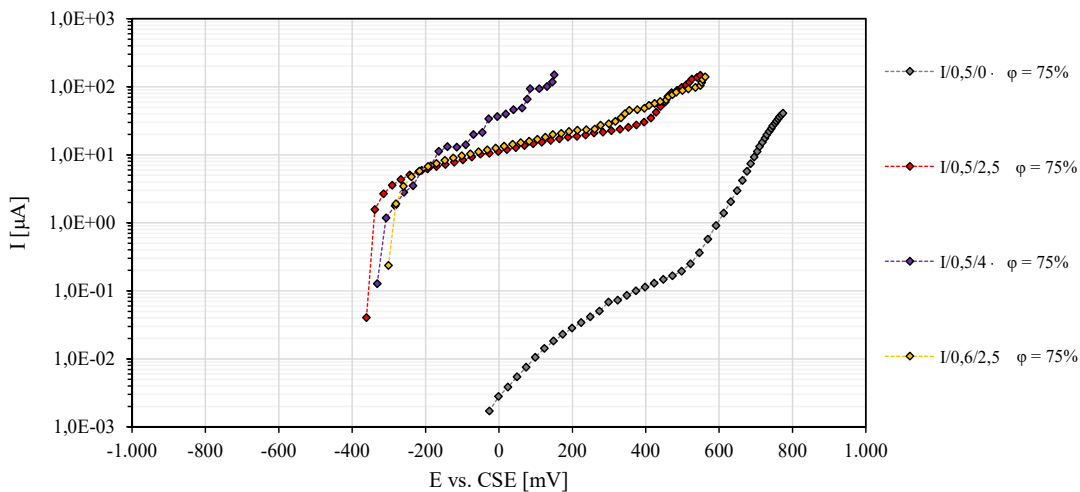


Abb. A.5 - 2: Anodische SPK der Messanoden der CEM I-Betone; $\varphi = 75\%$ – **Versuchsreihe B**

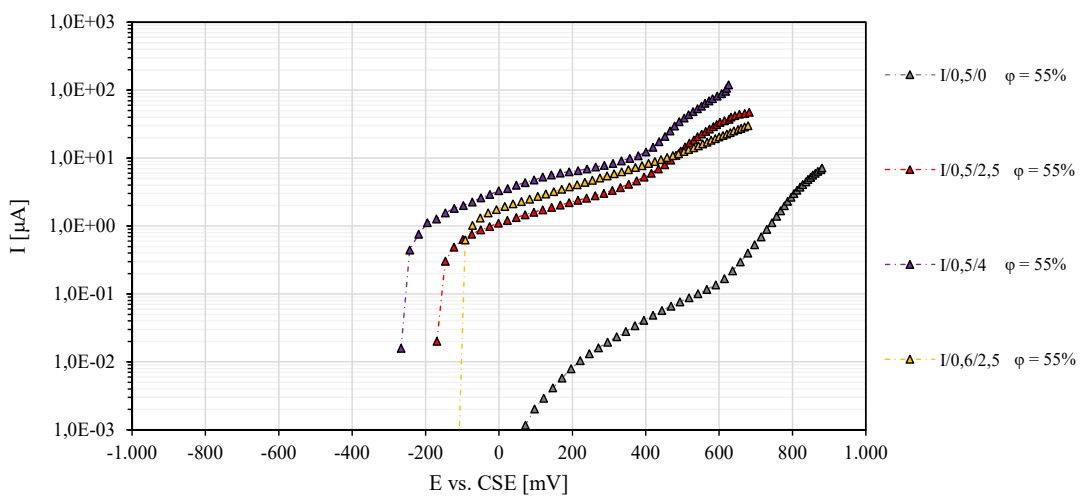


Abb. A.5 - 3: Anodische SPK der Messanoden der CEM I-Betone; $\varphi = 55\%$ – **Versuchsreihe B**

A.6 TOPOMETRIE UND QUERSCHNITTSVERLUSTE

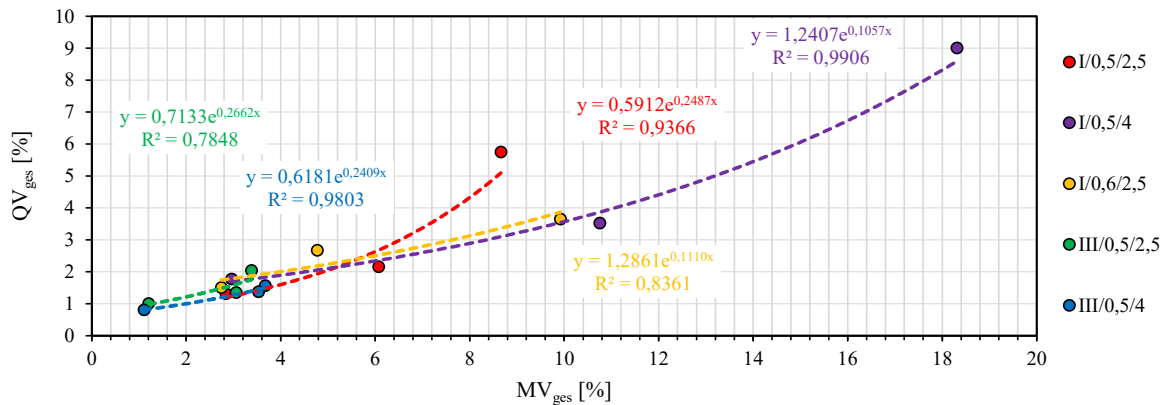


Abb. A.6 - 1: Exponentielle Regressionen der gesamten Masse- und Querschnittsverluste aller Serien; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtstufe – **Versuchsreihe B**

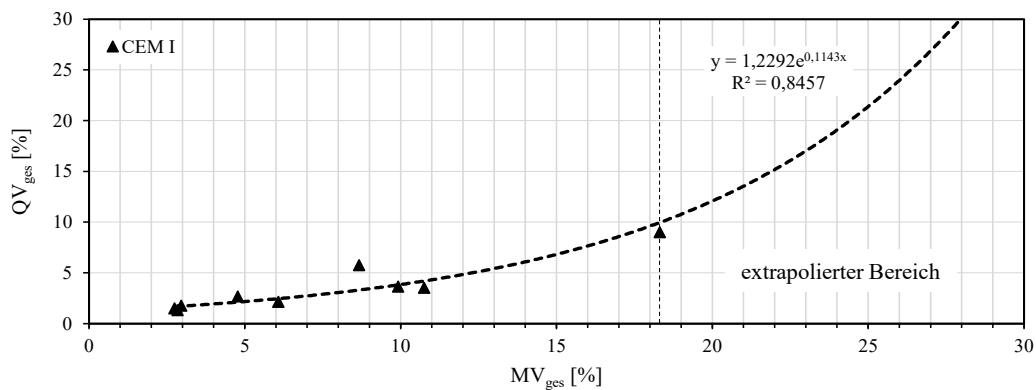


Abb. A.6 - 2: Exponentielle Regression der gesamten Masse- und Querschnittsverluste der CEM I-Serien in einer Grundgesamtheit; ein Messpunkt entspricht dem Median einer Serie und Feuchtstufe – **Versuchsreihe B**

A.7 KLIMADATEN

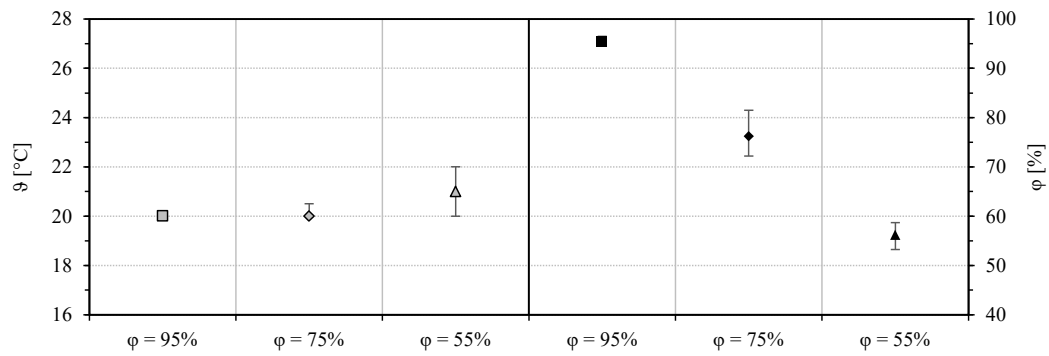


Abb. A.7 - 1: Statistik der aufgezeichneten Klimadaten bei den jeweiligen Lagerungsfeuchten über den Zeitraum der ZRA-Messungen (Messintervall 1h), Mediane, Streubreiten markieren unteres und oberes Quartil – **Versuchsreihe B**

ANHANG B: TABELLEN

B.1 MATERIALIEN

Tabelle B.1 - 1: Betonzusammensetzung¹ der Serien I/0,5/0; I/0,5/2,5; I/0,5/4

Bestandteil [-]	Masse [kg/m ³]	Dichte [kg/dm ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
CEM I 42,5 N	380	3,10	123
Wasser	190	1,00	190
GK 0/4 ²	1216	2,70	451
GK 4/8 ²	599	2,70	222
Luftporen	-	-	15
Summe	2386	2,39	1000

¹ Darstellung der Grundmischung ohne NaCl-Zugabe² Gesteinskörnung mit unterem/oberem Korndurchmesser [mm]Tabelle B.1 - 2: Betonzusammensetzung¹ der Serie I/0,6/2,5

Bestandteil [-]	Masse [kg/m ³]	Dichte [kg/dm ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
CEM I 42,5 N	317	3,10	102
Wasser	190	1,00	190
GK 0/4 ²	1253	2,70	464
GK 4/8 ²	617	2,70	229
Luftporen	-	-	15
Summe	2377	2,38	1000

¹ Darstellung der Grundmischung ohne NaCl-Zugabe² Gesteinskörnung mit unterem/oberem Korndurchmesser [mm]Tabelle B.1 - 3: Betonzusammensetzung¹ der Serien III/0,5/0; III/0,5/2,5; III/0,5/4

Bestandteil [-]	Masse [kg/m ³]	Dichte [kg/dm ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
CEM III/A 32,5 N-LH	380	3,10	123
Wasser	190	1,00	190
GK 0/4 ²	1216	2,70	451
GK 4/8 ²	599	2,70	222
Luftporen	-	-	15
Summe	2386	2,39	1000

¹ Darstellung der Grundmischung ohne NaCl-Zugabe² Gesteinskörnung mit unterem/oberem Korndurchmesser [mm]

Tabelle B.1 - 4: Ergebnisse der Siebanalyse

Siebweite [mm]	0	0,25	0,5	1	2	4	8
Siebdurchgang, soll [Vol.-%]	0	8	20	32	47	68	100
Siebdurchgang, ist [M.-%] = [Vol.-%]	0	9	22	36	51	68	100

Tabelle B.1 - 5: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonversuche¹

Prüfung	Einheit	I/0,5/0	I/0,5/2,5	I/0,5/4	I/0,6/2,5	III/0,5/0	III/0,5/2,5	III/0,5/4
Sieblinie	[-]	AB8	AB8	AB8	AB8	AB8	AB8	AB8
k-Wert ²	[-]	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27
Ausbreitmaß ³ soll	[cm]	38	38	38	38	38	38	38
Ausbreitmaß ³ ist	[cm]	39	39	36	38	38	40	36
LP-Gehalt ³ soll	[Vol.-%]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
LP-Gehalt ³ ist	[Vol.-%]	2,4	2,7	2,2	3,0	0,9	2,2	1,0
Konsistenzklasse	[-]	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2
ρ Frisch ³ , soll	[kg/dm ³]	2,39	2,39	2,39	2,38	2,39	2,39	2,39
ρ Frisch ³ , ist	[kg/dm ³]	2,41	2,41	2,41	2,38	2,41	2,40	2,44
$f_{cm, dry, cube}$ ⁴ , soll	[N/mm ²]	51	51	51	41	41	41	41
$f_{cm, dry, cube}$ ⁴ , ist	[N/mm ²]	49	50	51	40	43	62	53
gewähltes Vorhaltemaß	[N/mm ²]	8	8	8	8	8	8	8
Druckfestigkeitsklasse ⁵ soll	[-]	C30/37	C30/37	C30/37	C20/25	C20/25	C20/25	C20/25
Druckfestigkeitsklasse ⁵ ist	[-]	C30/37	C30/37	C30/37	C20/25	C25/30	C35/45	C30/37

¹ Darstellung alle Ergebnisse als Mittelwert der jeweiligen Betonmischung aus Versuchsreihe B² Körnungsziffer³ Frischbetonrohichte⁴ mittlere Druckfestigkeit am Würfel nach 28 d (Lagerung: 7 d unter Wasser, 21 d Laborklima)⁵ über Rückrechnung mit Vorhaltemaß, anstelle der Konformitätskriterien

Tabelle B.1 - 6: massebezogene Elementzusammensetzung der verwendeten Stähle¹

Versuchsreihe B	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	N
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
B500B, 1.0439 ²	0,195	0,248	0,871	0,018	0,036	0,127	0,033	0,147	0,0005	0,0096

¹ Analyse mittels Funkenemissionsspektrometrie, Fe-Anteil nicht angegeben

² Werkstoffnummer

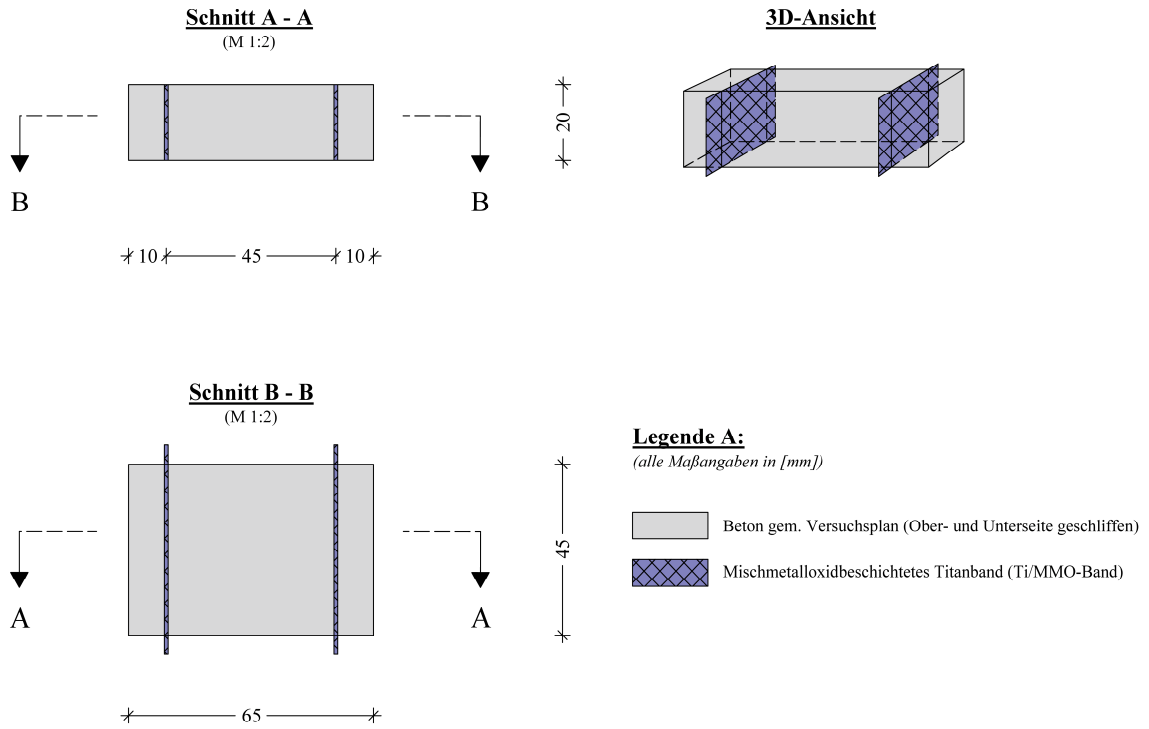
B.2 MESSGERÄTE

Tabelle B.2 - 1: Übersicht der verwendeten Messgeräte

Untersuchungsmethode	Messgeräte
Freie Korrosionspotentiale (E_{OC})	
a) bei R_p -Messung	a) Gamry Reference 600+; Ahlborn Almemo 2890-9 + Stecker ZA9000FS3
b) vor Wärmebehandlung	b) Testo 760-1; Voltcraft VC830
Korrosionspotentiale (E_{korrr})	
a) an Steckerleisten	a) Ahlborn Almemo 2890-9 + Stecker ZA9000FS3
b) dauerhafte Aufzeichnung	b) Ahlborn Almemo 710 + Stecker ZA9000FS3
Elementströme (I_{makro})	
a) an Steckerleisten	a) Gamry Interface 1010B; Gamry Reference 600+
b) dauerhafte Aufzeichnung (Abgleich)	b) Ahlborn Almemo 710 + Stecker ZA9601FS1
Polarisationswiderstand (R_p)	Gamry Reference 600+ mit Multiplexer ECM 8
Strom-Potentialkurven (SPK)	Gamry Reference 600+
Impedanzmessungen	
a) IR-Korrektur + EIS	a) Gamry Interface 1010B; Gamry Reference 600+; Gamry Reference 600; + Multiplexer
b) Widerstandsmessung R_{el}	b) Appa 703
Klimadaten (φ; ϑ)	Ahlborn Almemo Datenlogger (710; 2690-d; 2890-9; 5690n) mit Stecker FHAD46; Lascar EL-USB-2
Massen (m)	
a) Gravimetrie Anoden	a) Analysenwaage: METTLER TOLEDO XP105
b) Gravimetrie allgemein	b) Laborwaagen: Sartorius BA-BA 200 Sartorius CAH1G-300IG-H Sartorius CAW1P1-60ED-I METTLER TOLEDO ML6002T/00
Digitalmikroskopie	Keyence VHX-5000
Laserprofilometer	LMI Gocator 2520

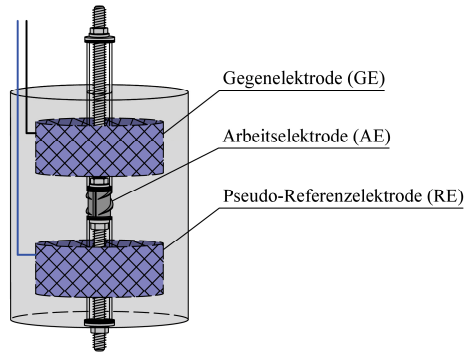
ANHANG C: PROBEKÖRPERAUFBAUTEN

C.1 VERSUCHSREIHE A



C.2 VERSUCHSREIHE B

3D-Ansicht

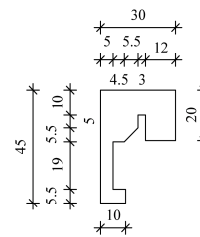


Abstandhalter B.1

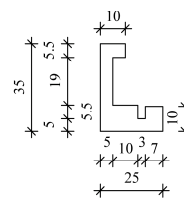
(M 1:3)

(nicht in PK dargestellt, jeweils 3 Stück, zueinander versetzt angeordnet; Material: PMMA; lasergeschnitten alle Maßangaben in [mm])

oben

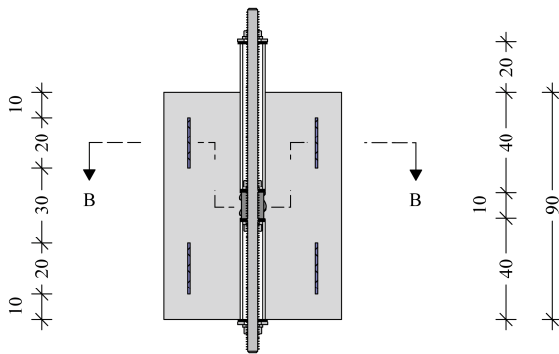


unten



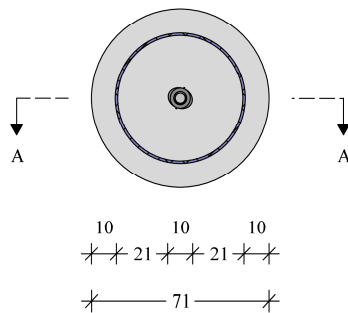
Schnitt A - A

(M 1:3)



Schnitt B - B

(M 1:3)



Legende B.1:

(alle Maßangaben in [mm])

- Beton gem. Versuchsplan (Oberfläche schalungsglatt)
- Mischmetalloxidbeschichtetes Titanband (Ti/MMO-Band, GE + RE)
- Schraubanode (AE, Werkstoffnummer 1.0439 mit Walzhaut); Gewindestange, Muttern, Unterlegscheiben (Werkstoffnummer 1.4401); Dichtscheiben (Material: NBR)
detaillierter Aufbau s. separate Abbildung
- Litzen 0,75 mm², an Ti/MMO-Band gepunktet, mit EP isoliert