

# **Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten von chloridhaltigem Beton und Folgen für die Korrosionsaktivität des Betonstahls**

Im Fachbereich  
Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Felix Becker, M. Eng.**

aus München

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar
Prüfungsvorsitz:	Prof. Dr.-Ing. habil. Christos Vrettos
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit
2. Berichterstatterin:	Prof. Dr.-Ing. Gesa Kapteina
3. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2022

Kaiserslautern 2022

(D 386)



## Kurzfassung

Mit Durchführung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 nach der Technischen Regel Instandhaltung, kurz TR-IH; wird zunächst keine direkte Repassivierung des Bewehrungsstahls angestrebt. Der Instandsetzungserfolg ist vielmehr an die zeitliche Änderung der korrosionsrelevanten Kenngrößen gekoppelt. Hierzu zählen die Erhöhung des spezifischen Elektrolytwiderstands des Betons infolge von Austrocknung sowie die Abnahme der Korrosionsströme und Treibspannungen am Bewehrungsstahl.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden grundlegende Untersuchungen zur Wirkungsweise und zu den Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsverfahrens 8.3 durchgeführt. Zur Beschreibung der Feuchteaufnahme und Feuchtespeicherung von chloridbelastetem Beton im Vergleich zu chloridfreiem Beton erfolgte die Untersuchung der Sorptionsisotherme an Betonen mit unterschiedlichen Chloridgehalten. Im Weiteren erfolgte die Untersuchung des Austrocknungsverhaltens von chloridbelasteten Betonproben unter eher diffusionsoffenen und stark diffusionsbremsenden Beschichtungen. Zusammen mit dem Austrocknungsverhalten wurde auch die Korrosionsaktivität der Bewehrung mittels elektrochemischer Messmethoden untersucht.

Die korrosionsbremsende Wirkungsweise des Verfahrens 8.3 wird bei niedrigen Wassergehalten primär durch eine anodische Steuerung der Korrosion als maßgeblicher Faktor beeinflusst. Der spezifische Elektrolytwiderstand hat als Systembestandteil im untersuchten Aufbau einen wichtigen, aber für den Nachweis des Instandsetzungserfolgs nicht hinreichenden Anteil, wenngleich er eine gute Korrelation mit der Austrocknung des Betons besitzt. Zur Bewertung der Korrosionskinetik ist die alleinige Betrachtung des spezifischen Elektrolytwiderstands daher ungeeignet.

Im Hinblick auf die Anwendungsgrenze des Verfahrens 8.3 zeigt sich der auf Höhe des Betonstahls im Beton vorhandene Chloridgehalt als ein maßgebliches Kriterium. Während die Korrosionsaktivität selbst bei moderat austrocknenden Proben unter stark diffusionsbremsenden Beschichtungen bei Chloridgehalten von 1 M.-% Cl/z im Bereich der Passivstromdichte liegt, ist eine vergleichbare Reduktion der Stromdichten bei Chloridgehalten von 2 M.-% Cl/z von weiteren Randparametern abhängig. Die Art der Beschichtung beeinflusst die Austrocknung des Betons entscheidend. So kann ein weniger dichter Beton unter einer diffusionsoffenen Beschichtung (OS 4) so weit austrocknen, dass die Passivstromdichte erreicht wird. Bei eher diffusionsdichten Beschichtungen und Vorhandensein hoher Chloridgehalte von 2 M.-% Cl/z führte das Instandsetzungsverfahren 8.3 bei dem gewählten Versuchsaufbau innerhalb üblicher Zeiträume (hier 1,5 Jahre) nachweislich nicht zum Erfolg (unschädliche Korrosionsraten).

## **Abstract**

The implementation of maintenance method 8.3 according to TR Instandhaltung is not to directly re-passivate the reinforcing steel. Rather, the success of the repair is linked to the change over time of the corrosion-relevant parameters. These include the increase in the specific electrolyte resistance of the concrete as a result of drying out and, consequently, the decrease in the corrosion currents and driving potential differences of the reinforcing steel.

Within the scope of this work, basic investigations were carried out on the mechanism and the application limits of the repair method 8.3. To describe the moisture absorption and moisture storage of chloride-containing concrete in comparison to chloride-free concrete, the sorption isotherm of concretes with different chloride contents was investigated. Furthermore, the drying behaviour of chloride-loaded concrete samples was investigated under rather diffusion-open and rather diffusion-blocking coatings. Together with the drying behaviour, the corrosion activity of the reinforcement was also investigated using electrochemical measurement methods.

At low water contents, the mechanism of method 8.3 is mainly influenced by anodic control of corrosion as a decisive factor. The specific electrolyte resistance has an important, but not dominating role as a system component in the investigated test-setup, although it has a good correlation with the drying of the concrete. For the evaluation of the corrosion kinetics, the sole consideration of the specific electrolyte resistance is unsuitable.

About the application limit of repair method 8.3, the chloride content present in the concrete has been detected as a decisive criterion. While the corrosion activity even in moderately drying specimens under diffusion-inhibiting coatings is in the range of passive current density at chloride contents of 1 wt.-%/cem, this cannot generally be determined for chloride contents of 2 wt.-%/cem. The type of coating has then a decisive influence on the drying of the concrete. For example, less dense concrete under a rather diffusion-open coating (OS 4) can dry out to such an extent that the passive current density is achieved. In the case of rather diffusion-tight coatings and the presence of high chloride contents of 2 wt.-%/cem, the repair method 8.3 demonstrably did not lead to success within practical time periods (1.5 years) according to the available test results.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Arbeitsmodelle und Methodik</b>	<b>4</b>
2.1 Fragestellung	4
2.2 Arbeitsmodelle	5
2.3 Vorgehen	6
<b>3 Grundlagen zur Instandsetzung von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen</b>	<b>8</b>
3.1 Allgemeines	8
3.2 Instandsetzungsprinzip Repassivierung des Betons (Verfahren 7.2)	10
3.3 Instandsetzungsprinzip Kathodischer Korrosionsschutz (Verfahren 10.1)	12
3.4 Instandsetzung durch Absenkung des Wassergehalts und Verringerung der elektrolytischen Leitfähigkeit (Verfahren 8.3)	14
3.4.1 Allgemeines	14
3.4.2 Bisherige Untersuchungen zum Verfahren 8.3	15
3.4.3 Umsetzung des Verfahrens 8.3	16
3.4.4 Oberflächenschutzsysteme bei der Instandsetzung mittels Verfahren 8.3	18
3.4.5 Rechtliche Bewertung des Instandsetzungsprinzips Verfahren 8.3	20
3.4.6 Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des Verfahren 8.3	21
3.4.7 Offene Fragestellungen zur Anwendung des Verfahrens 8.3	22
<b>4 Materialspezifische Grundlagen</b>	<b>24</b>
4.1 Allgemeines	24
4.2 Feuchtehaushalt von Beton	24
4.2.1 Allgemeines	24
4.2.2 Sorptionsverhalten von Beton	25
4.2.3 Sorptionsverhalten von chloridhaltigem Beton	28
4.2.4 Einfluss der Feuchtigkeit auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton	30
4.3 Spezifischer elektrolytischer Widerstand von Beton	31
4.3.1 Allgemeines	31
4.3.2 Einflussfaktoren auf den spezifischen Elektrolytwiderstand von Beton	32
4.3.3 Einfluss des spezifischen Elektrolytwiderstands auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton	34
4.4 Korrosion von Stahl in Beton	37
4.4.1 Allgemeines	37
4.4.2 Einleitungsphase	38

4.4.3	Initiierung der Korrosion	39
4.4.4	Korrosionsphase	39
4.4.5	Korrosionsabtrag	41
<b>5</b>	<b>Versuchskonzeption und Untersuchungsmethoden</b>	<b>43</b>
5.1	Allgemeines	43
5.2	Versuchsreihe und Ziele	43
5.3	Probekörper zu den Versuchsreihen	44
5.3.1	Entwicklung und Geometrie der Probekörper	44
5.3.2	Eingesetzte Materialien	46
5.4	Versuche zur Bestimmung der Sorptionsisotherme von chloridhaltigem Beton	48
5.5	Versuche zur Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands der Probekörper	50
5.5.1	Allgemeines	50
5.5.2	Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands bei Ausgleichsfeuchte	51
5.5.3	Bestimmung der spezifischen Elektrolytwiderstände von Beton zum Nachweis der Austrocknung unter einer Beschichtung	52
5.6	Elektrochemische Versuche zur Bestimmung der Korrosion	52
5.6.1	Bestimmung des freien Korrosionspotentials	52
5.6.2	Bestimmung des Korrosionsstroms	54
5.6.3	Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands	55
5.6.4	Bestimmung der Korrosionskinetik mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie	57
5.7	optische Bestimmung der Anodenfläche der Korrosionsnarben	62
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>63</b>
6.1	Allgemeines	63
6.2	Sorptionsisotherme	63
6.2.1	Allgemeines	63
6.2.2	Einfluss der Zementart und des Wasserzementgehalts auf die Sorptionsisotherme	64
6.2.3	Einfluss des Chloridgehalts auf die Sorptionsisotherme	67
6.2.4	Zusammenfassung Sorptionsisotherme	69
6.3	Zeitliche Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands	71
6.3.1	Allgemeines	71
6.3.2	Spezifischer Elektrolytwiderstand bei Feuchtedesorption des Betons	72
6.3.3	Spezifischer Elektrolytwiderstand bei Feuchteadsorption des Betons	76
6.3.4	Zeitliche Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands bei beschichteten Stahlbetonproben und trockener Umgebung	78

---

6.3.5 Zusammenfassung zur Untersuchung des spezifischen Elektrolytwiderstands	83
6.4 Zeitliche Entwicklung der Korrosionsparameter bei Austrocknung von beschichtetem Beton	85
6.4.1 Allgemeines	85
6.4.2 Zeitliche Entwicklung des freien Korrosionspotentials bei der Austrocknung des Betons unter Beschichtungen	85
6.4.3 Zeitliche Entwicklung der Korrosionsströme bei der Austrocknung des Betons unter Beschichtungen	88
6.4.4 Entwicklung des Polarisationswiderstands bei der Austrocknung des Betons	92
6.4.5 Elektrochemische Impedanzspektroskopie in feuchtem und trockenem Beton	94
6.4.6 Zusammenfassung der Entwicklung der Korrosionsparameter bei Austrocknung des Betons über die Zeit	98
6.5 Ergebnisse der optischen Oberflächenuntersuchung	99
<b>7 Numerische Simulation des Austrocknungsverhaltens</b>	<b>101</b>
7.1 Allgemeines	101
7.2 Klimatische Feuchteszenarien der Simulation	102
7.3 Austrocknungsverhalten von chloridfreien und chloridbelasteten Bauteilen unter den Feuchtebedingungen einer Tiefgarage	103
7.4 Einfluss der Austrocknung auf den spezifischen Elektrolytwiderstand des Stahlbetons	105
7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der numerischen Simulation	107
<b>8 Schlussfolgerungen</b>	<b>108</b>
8.1 Allgemeines	108
8.2 Sorptionsisotherme	108
8.3 Austrocknung unter Beschichtungen	108
8.4 Elektrolytwiderstandsmessung als Methode des Korrosionsmonitorings	109
8.5 Potentialmessungen als Methode des Korrosionsmonitorings	109
8.6 Korrosionsstromdichten unter Oberflächenschutzsystemen	109
8.7 Bewertung der Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsverfahrens	110
<b>9 Ausblick</b>	<b>114</b>
<b>10 Literatur</b>	<b>115</b>
<b>11 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>12 Tabellenverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>13 Lebenslauf des Verfassers</b>	<b>134</b>

<b>Anhang A: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gängiger Instandsetzungsvarianten mit dem Verfahren 8.3</b>	<b>136</b>
<b>Anhang B: Messergebnisse</b>	<b>141</b>



## 1 Einführung

Als Baustoffkombination und Konstruktionsmaterial unterliegt Stahlbeton Umwelteinwirkungen, die seine Eigenschaften über die Zeit verändern. Sofern diese Expositionen den Materialwiderstand eines Stahlbetonbauteils negativ beeinflussen, kann dies über die Lebensdauer zu einer Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit bis hin zum Verlust der Tragfähigkeit führen.

Einen maßgeblichen Schädigungseinfluss auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton stellt die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion dar. So wirken auf Infrastrukturbauwerke Chloride aus Tausalz ein. Dringen diese Chloride zusammen mit Feuchtigkeit in den Beton ein und erreichen in einer kritischen Konzentration die Bewehrung, löst sich die den Stahl schützende Passivschicht lokal auf und es kommt zu einer querschnittsmindernden fortschreitenden Lochkorrosion. Bereits 1982 beschreibt Tuutti den Schädigungsablauf von Korrosion in Beton mit der Initiierungs- und der Schädigungsphase [1].

Erreichen die Stahlbetonbauteile aufgrund der Schädigung ihre geplante Lebensdauer nicht, müssen aufwendige Instandsetzungsmaßnahmen oder Ersatzbaumaßnahmen durchgeführt werden, um die gewünschte Nutzungsdauer zu erreichen. Hieraus ergeben sich signifikante volkswirtschaftliche Nachteile mit hohen finanziellen Aufwendungen sowie Auswirkungen auf die nähere Umwelt durch Lärm und Staub, aber auch globale Auswirkungen aufgrund der zusätzlich emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen [2]. Untersuchungen der ETH Zürich [3] und des US Department of Transportation [4] kalkulieren den volkswirtschaftlichen Kostenaufwand für die Instandsetzung der Korrosionsschäden bei Ingenieurbauwerken in einer Spanne zwischen jährlich 0,08 % (Schweiz) und 0,18 % (USA) des jeweiligen Bruttoinlandsprodukts. Überträgt man diese Ergebnisse konservativ mit einem Kostenansatz von 0,1 % des deutschen Bruttoinlandsprodukts [5] und korreliert dieses Ergebnis mit den Korrosionsschäden an Brücken der Bundesfernstraßen (Klassifizierung A und B) nach Daten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom März 2019, lässt sich ein jährlich entstehender Instandsetzungsbedarf für die Beseitigung der Schäden durch chloridinduzierte Korrosion allein für diesen Infrastrukturbereich mit 2,5 Mrd. Euro abschätzen. Bei einem 2019 aufgewendeten öffentlichen Bauinvestitionsvolumen im Bereich der Bundesfernstraßen von rd. 7,76 Mrd. Euro [6] entspräche dieser finanzielle Aufwand einem Kostenanteil von rd. 32 %.

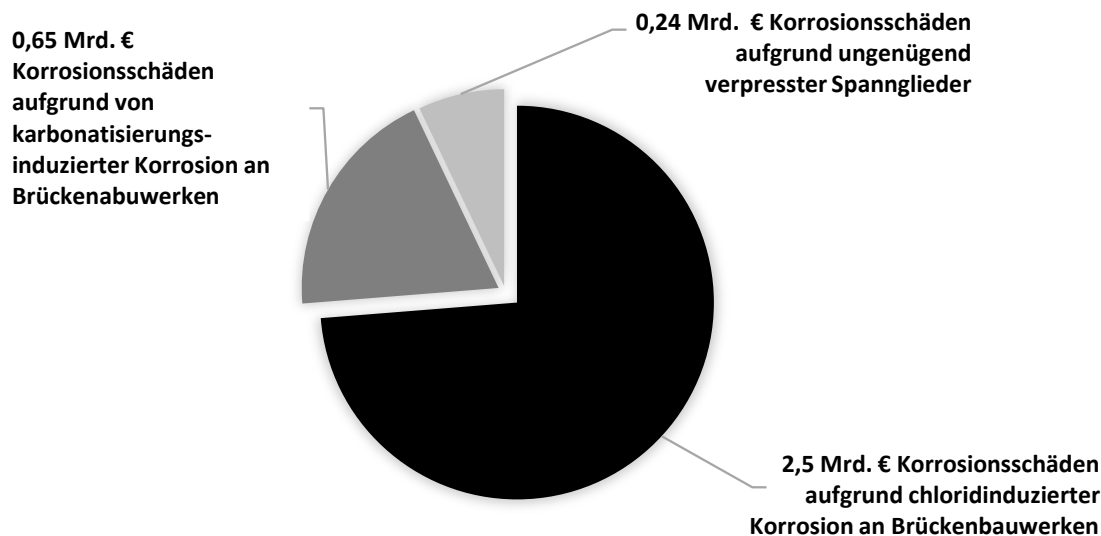


Abbildung 1-1: Geschätzter jährlicher Instandsetzungsbedarf zur Beseitigung der Korrosionsschäden an Ingenieurbauwerken in Deutschland nach Daten von [5; 6] und eigener Berechnung

Die in Abbildung 1-1 dargestellte abgeschätzte Kostenaufstellung bezieht sich hierbei ausschließlich auf Ingenieurbauwerke im Bereich der Bundesfernstraßen. Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Infrastrukturbauwerke, die von einem erhöhten Chlorideintrag und damit von chloridinduzierter Bewehrungskorrosion betroffen sind.

Hierzu zählen im Besonderen Parkbauten wie Parkhäuser und Tiefgaragen, die einen substantiellen Beitrag zur städtischen Lebensqualität der Bevölkerung erbringen, indem sie die Pkws aus dem öffentlichen Straßenraum aufnehmen und so Platz für Grünzonen, Radverkehrswege und Fußgängerzonen schaffen. Laut Schätzung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur sind in Deutschland lediglich 3 % der zugelassenen Pkws gleichzeitig im Straßenverkehr unterwegs [7]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass rd. 46 Mio. Pkws in Deutschland gleichzeitig parken und damit einen entsprechenden Platzbedarf aufweisen. Diese Zahlen verdeutlichen die gesellschaftliche Bedeutung von Parkbauten und die Notwendigkeit für den Erhalt von Parkhäusern und Tiefgaragen wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen zu erarbeiten.

Derzeit wird die überwiegende Anzahl der geschädigten Stahlbetonbauteile gemäß den Vorgaben der Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen (RL-SIB) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [8] und der Technischen Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung) - Teil 1 [9] konventionell mittels Entfernen des chloridhaltigen Betons und anschließender Reprofilierung instand gesetzt, siehe auch [10].

Auch wenn dieses Instandsetzungsverfahren nach derzeitiger Auslegung den „Anerkannten Regeln der Technik“ zuzuordnen ist, hat es auch deutliche Nachteile. So ergibt sich durch diese Instandsetzungsvariante ein maßgeblicher Eingriff in die

Bausubstanz, wodurch die Maßnahme häufig zu teuren Abstützungsmaßnahmen, langen Sperrzeiten und zu einem erhöhten Emissionsaufkommen führt.

Über die konventionelle Instandsetzung hinaus ergeben sich aus den Regelwerken [8; 9] noch weitere Instandsetzungskonzepte.

Ein Teil dieser Konzepte, wie die Instandsetzung mit Kathodischem Korrosionsschutz, hat sich am Markt etabliert und ist bei Anwendung mit Titanmischoxidbändern mittlerweile auch den „Anerkannten Regeln der Technik“ zuzuordnen.

Eine weitere technisch sowie wirtschaftlich interessante Instandsetzungsmaßnahme stellte das Verfahren 8.3 dar. Hierbei verbleibt der chloridhaltige Beton im Bauteil und die im Rahmen des Instandsetzungsprinzips aufgetragene Beschichtung der Betonbauteile verhindert die erneute Wasser- und Chloridaufnahme und lässt den Beton über die Zeit austrocknen. Dies führt zu einer Erhöhung des elektrolytischen Betonwiderstands, wodurch die Geschwindigkeit der Korrosionsprozesse über die Zeit reduziert werden kann. Dem auf den ersten Blick großen Kostenvorteil steht der Nachteil entgegen, dass diese Instandsetzungsvariante die ablaufenden Korrosionsprozesse nicht sofort unterbindet und ein kontinuierliches Monitoring die Wirksamkeit der Instandsetzungsmaßnahme nachweisen muss. Hinsichtlich der Wirkungsweise und den Anwendungsgrenzen bestehen derzeit noch sehr große Unsicherheiten, sodass die Instandsetzung mittels Verfahren 8.3 in der Praxis nur begrenzt Anwendung findet.

## 2 Arbeitsmodelle und Methodik

### 2.1 Fragestellung

Im Unterschied zu den gängigen Instandsetzungsverfahren wie dem konventionellen Betonabtrag (Verfahren 7.2) oder dem kathodischen Korrosionsschutz (Verfahren 10) führt eine Instandsetzung mittels Beschichtung und Trocknung nicht zum sofortigen Schutz des Bewehrungsstahls in chloridbelastetem Beton. Korrosionsprozesse können damit über einen undefinierten Zeitraum weiter ablaufen und die Bewehrung weiter schädigen.

Im Rahmen der Arbeit sollen praxisrelevante Fragen zum Austrocknungsverhalten von chloridhaltigem Beton und die Auswirkung der Austrocknung auf die Korrosionsaktivität des Stahls in Beton geklärt werden, um die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 in der Praxis abzusichern.

Zum derzeitigen Wissensstand liegen keine validierten Erkenntnisse zur Wirkungsweise einer Instandsetzung durch Beschichten und Austrocknen des mit Chloriden belasteten Betons vor. So ist es nicht geklärt, inwieweit chloridbelasteter Beton aufgrund der hygroskopischen Wirkung des Chlorids austrocknen kann, welche Effekte eine diffusionsbremsende Beschichtung auf das Austrocknungsverhalten dieser Betone hat und ob sich die Korrosionsaktivität über die weitere Nutzungsdauer auf ein Maß reduzieren lässt, dass die Dauerhaftigkeit des Stahlbetons sichergestellt ist.

Entsprechend soll das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bezüglich der Feuchtedesorption durch unterschiedliche Oberflächenschutzsysteme (OS-Systeme) hindurch untersucht werden.

Folgende Teilaspekte werden dabei aus der Fragestellung abgeleitet und sollen im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden:

- Wie stellt sich das Sorptionsverhalten von chloridbelasteten Betonen dar? Ist ein Austrocknen dieser Betone unter praxisnahen Bedingungen möglich?
- Welches Austrocknungsverhalten zeigen beschichtete, chloridhaltige Betonprobekörper und welche Auswirkung hat die Austrocknung auf den Elektrolytwiderstand des Betons?
- Kann durch die Erhöhung des elektrolytischen Widerstands eine hinreichende elektrolytische Kontrolle (Widerstandskontrolle) der Korrosion erreicht werden?
- Führt eine Austrocknung der Probekörper dazu, dass die Korrosionsaktivität der Anode soweit reduziert wird, dass eine anodische Kontrolle der Anode möglich ist (Repassivierung)?

## 2.2 Arbeitsmodelle

Die Makrozellenkorrosion in einem Elektrolyten lässt sich durch ein in DIN 50919 [11] beschriebenes elektrisches Ersatzschaltbild modellhaft darstellen. Für das Korrosionssystem Stahl in Beton lässt sich hierfür das in der Literatur [12–14] gebräuchliche und in Abbildung 2-1 dargestellte Ersatzschaltbild mit den dazugehörigen elektrochemischen Prozessen folgern.

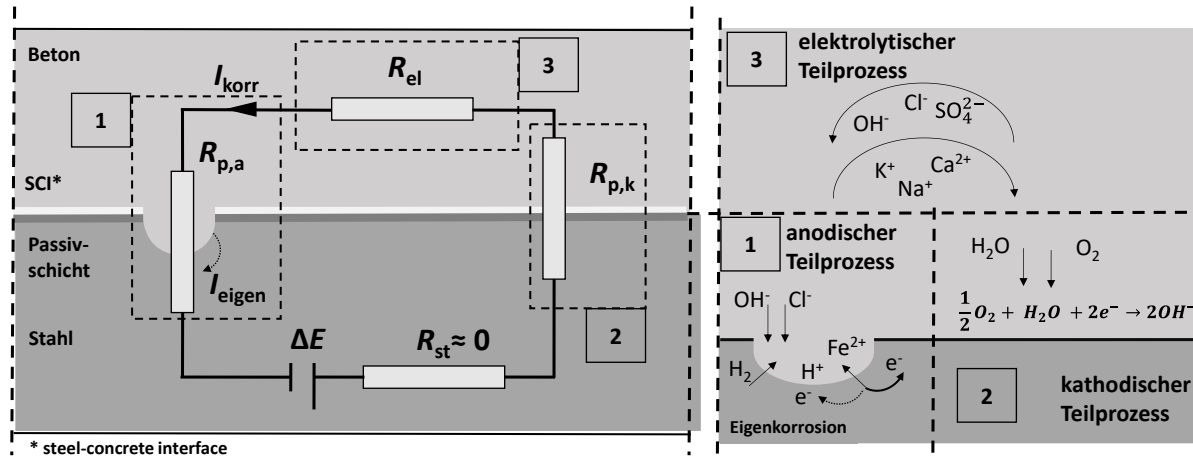


Abbildung 2-1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur Beschreibung des Korrosionssystems Stahl in Beton mit den elektrochemischen Prozessen bei einer lokalen Auflösung der Passivschicht z. B. durch Chloride [Eigene Darstellung in Anlehnung an [12–14]]

Nach dem Ohm'schen Gesetz ergibt sich der Korrosionsstrom  $I_{korr}$  aus dem Quotienten des Korrosionspotentials  $\Delta E$  und der in Reihe geschalteten Übergangswiderstände  $R_p$  an Anode und Kathode sowie des elektrolytischen Widerstands des Betons  $R_{el}$  und einem Anteil an Eigenkorrosion, vgl. Gleichung 2-1. Der Widerstand des Bewehrungsstahls kann dabei, als nachweislicher Elektrodenleiter, vernachlässigt werden. Zusätzlich zu den dargestellten Widerständen sind zur Beschreibung des Korrosionselements bei zeitlich veränderter Aktivierung wirksame Kondensatoren [13] und Constant Phase Elemente [15] erforderlich, die in der Abbildung 2-1 nicht dargestellt werden. Die Beschreibung dieser Komponenten erfolgt in Abschnitt 6.3.5.

$$I_{korr} = \frac{\Delta E}{R_{p,a} + R_{el} + R_{p,k}} + I_{eigen}$$

Gleichung 2-1

$I_{korr}$	Korrosionsstrom	[A]
$\Delta E$	Potentialunterschied zwischen Anode und Kathode	[V]
$R_{p,a}$	Polarisationswiderstand der Anode	[ $\Omega$ ]
$R_{p,k}$	Polarisationswiderstand der Kathode	[ $\Omega$ ]
$R_{el}$	Elektrolytwiderstand des Betons	[ $\Omega$ ]
$I_{eigen}$	Eigenkorrosion	[A]

Wie Gleichung 2-1 zeigt, bestimmen die einzelnen Teilwiderstände in Abhängigkeit ihrer Größenordnung die Korrosionsgeschwindigkeit. Daraus ist eine Verringerung der Reaktionskinetik (ausgedrückt als  $i_{\text{korrr}}$ ) u. a. durch eine Erhöhung der Teilwiderstände möglich. Nach [13] kann es zu folgenden maßgeblichen Kontrollmechanismen der Korrosion kommen:

- anodische Kontrolle des Korrosionssystems,
- kathodische Kontrolle des Korrosionssystems,
- Widerstandskontrolle des Korrosionssystems,
- Mischformen der einzelnen Kontrollwirkungen.

Hieraus lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung des elektrolytischen Betonwiderstands als materialspezifischer Parameter den Ionentransport im Beton soweit behindern kann, dass ablaufende Korrosionsprozesse auf ein unschädliches Maß reduziert werden. Die Erhöhung des Betonwiderstands kann durch eine signifikante Reduktion der wässrigen Porenlösung im Porengefüge des Betons erreicht werden.

### 2.3 Vorgehen

Im Rahmen der Arbeit werden, nach der Einführung (Kapitel 1) und der Beschreibung der Arbeitsmodelle und der Methodik (Kapitel 2), in **Kapitel 3** die baupraktischen Instandsetzungsmaßnahmen anhand einer Literaturrecherche erläutert und abschließend eine Untersuchung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt.

**Kapitel 4** klärt den zum Verständnis der durchgeführten Untersuchungen erforderlichen theoretischen Hintergrund zu den Themen Feuchte und Feuchtetransport, elektrolytischer Widerstand sowie zur chloridinduzierten Korrosion in Stahlbeton.

Die Versuchskonzeption mit Probekörperaufbau und den verwendeten Materialien sowie die Untersuchungsmethoden und die Messtechnik werden in **Kapitel 5** dargestellt. Der Hauptteil dieser Untersuchungen wurde im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhabens (BR 4026/3-1; DA 1325/2-1) [16] durchgeführt. Zum besseren Verständnis der Korrosionskinetik im austrocknenden Beton wurden an weiteren Probekörpern die ablaufenden Teilprozesse mit Hilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS-Messung) unter der Verwendung von Ersatzschaltbildern untersucht.

Die Ergebnisse und die deren Diskussion ergibt sich aus **Kapitel 6**. Aufbauend auf den Ergebnissen wird in **Kapitel 7** das Austrocknungsverhalten von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen in einer numerischen Simulation über einen Zeitraum von zehn Jahren berechnet und die sich daraus ableitende Entwicklung des spezifischen

Elektrolytwiderstands. Abschließend werden die Erkenntnisse in **Kapitel 8** im Hinblick auf die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 bewertet und in **Kapitel 9** ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Das Ablaufschema der Arbeit wird in Abbildung 2-2 dargestellt. Weiter ergibt sich hieraus die Verknüpfung der Ziele mit den einzelnen Untersuchungsfeldern.

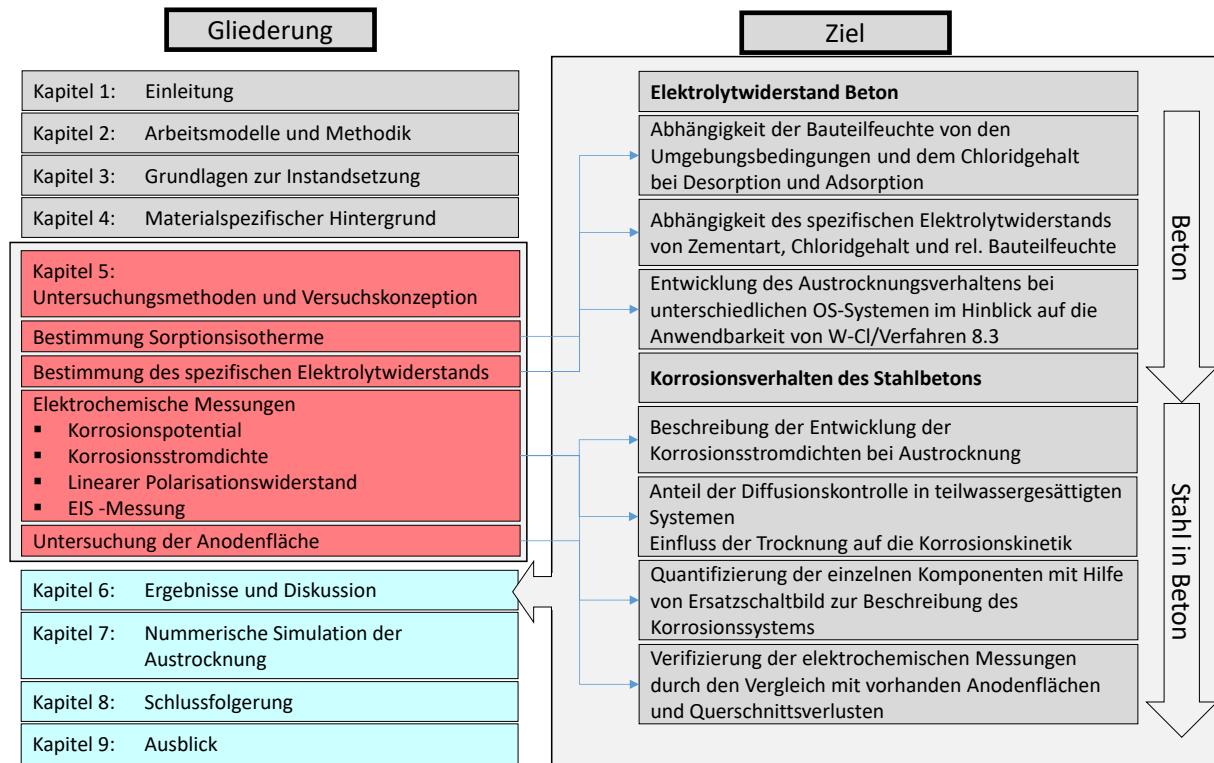


Abbildung 2-2: Ablaufschema der Arbeit mit Gliederung und den Teilaspekten der Fragestellung

### 3 Grundlagen zur Instandsetzung von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen

#### 3.1 Allgemeines

Instandsetzungsmaßnahmen dienen der Wiederherstellung eines Bauteilzustandes und/oder einer Bauteilfunktion, so dass die prognostizierte Soll-Lebensdauer erreicht oder eine ausreichende Restlebensdauer sichergestellt wird. Abbildung 3-1 gibt hierfür exemplarisch ein Beispiel und zeigt die Entwicklung des Bauwerkszustands bzw. der Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils infolge der Nutzung über den Lebenszyklus in Anlehnung an [9] und [17].

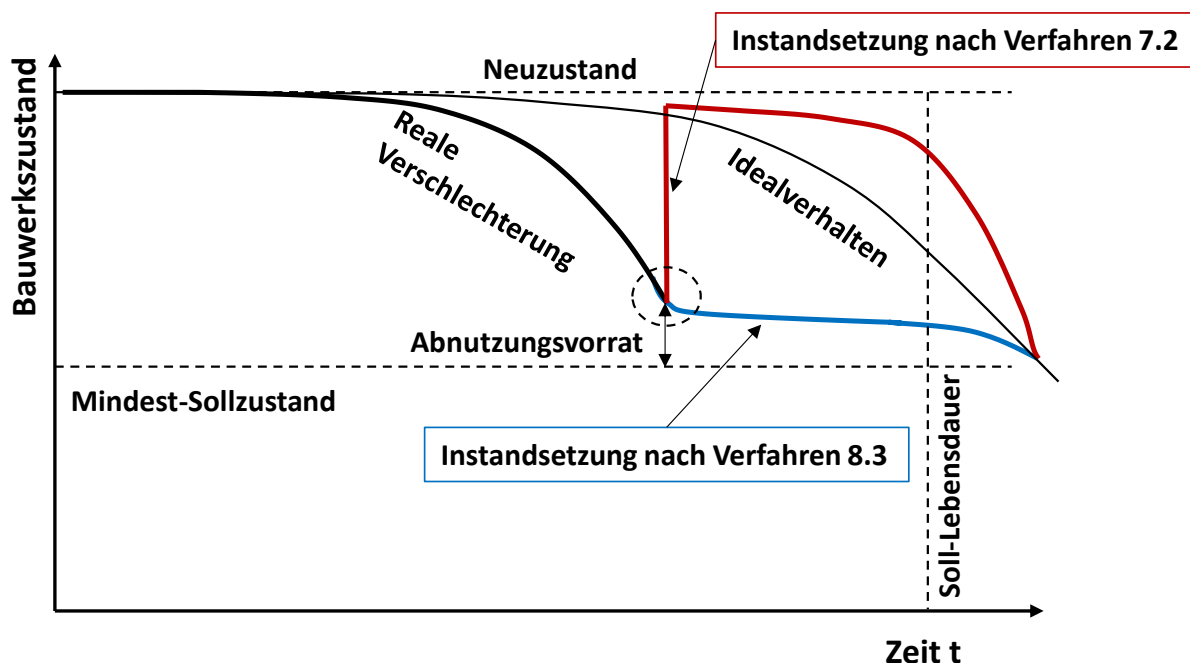


Abbildung 3-1: Entwicklung des Bauwerkszustands über die Lebensdauer in Anlehnung an [17]

Die Dauerhaftigkeit des Stahlbetons kann durch verschiedene Einwirkungen beeinträchtigt werden. DIN EN 206 [18] berücksichtigt hierbei im Rahmen von Expositionsklassen Einwirkungen, die einen lebensdauerbegrenzenden Einfluss auf den Beton oder auf den Bewehrungsstahl im Beton besitzen [17]. Die Betrachtungen im Folgenden beziehen sich auf Instandsetzungsverfahren, die infolge einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion angewendet werden können.

Nach RL-SIB [8] und TR-IH wird in Anlehnung an Untersuchungen aus [19] ein Chloridgehalt von 0,5 M.-%/z angegeben, ab dem ein Sachkundiger Planer das Korrosionsrisiko der Bewehrung bewerten muss. Kommt es durch die Chloridbelastung und aufgrund der Randbedingungen, z. B. zusammen mit Carbonatisierung oder einer intermittierenden Feuchtebeaufschlagung, zu Bewehrungskorrosion, sind zur Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit und zum



Erreichen der angestrebten Restnutzungsdauer Instandsetzungsmaßnahmen durchzuführen.

In einem ersten Schritt muss der ablaufende Korrosionsprozess im Stahlbeton aufgehalten werden. Ebenso werden in der Regel weitere Maßnahmen wie Betondeckungserhöhungen oder Applikation einer geeigneten Beschichtung zum weiteren Schutz der Bauteile angeordnet, sodass eine erneute Depassivierung des Bewehrungsstahls über die Restnutzungsdauer des Bauteils verhindert wird.

Sowohl die RL-SIB [8] mit ihrer Nachfolgeregelung, der Technischen Regel Instandhaltung (TR-IH) Teil 1 [9] und Teil 2 [20] als auch DIN EN 1504-9 [17] unterscheiden bei den Instandsetzungsprinzipien nach dem jeweiligen Schutzprinzip. Abbildung 3-2 zeigt die Zuordnung der Instandsetzungsprinzipien für chloridbelasteten Beton entsprechend der Schutzwirkung nach RL-SIB [8] und TR-IH [9]. Die Nomenklatur der TR-IH wurde weitestgehend an DIN EN 1504-9 angepasst.

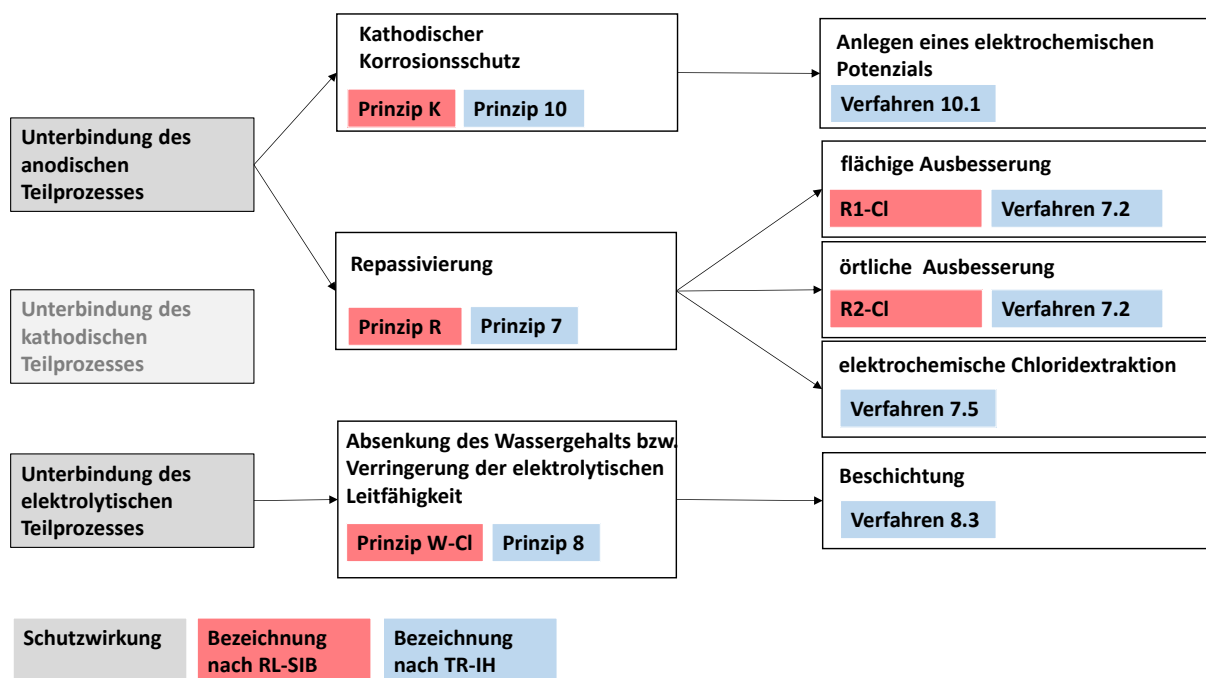


Abbildung 3-2: Zuordnung der Instandsetzungsprinzipien für chloridbelasteten Beton entsprechend der Schutzwirkung in Anlehnung an die Regelwerke [8; 9; 17]

Das gebräuchlichste Schutzprinzip besteht darin, die ablaufende Eisenauflösung an der Anode zu unterbinden. Die Verhinderung des anodischen Teilprozesses kann beispielsweise durch die Repassivierung des Stahls mittels Betonabbruch und Betonersatz erfolgen.

Der elektrolytische Teilprozess kann über die Absenkung des Wassergehalts und die daraus folgende Verringerung der elektrolytischen Leitfähigkeit des Betons kontrolliert werden. Ziel der Maßnahme ist es, den Transport der negativ geladenen (OH<sup>-</sup>)-Ionen zu unterbinden.

Die Kontrolle des kathodischen Teilprozesses kann baupraktisch meist schwer umgesetzt werden, da es die Abwesenheit von Sauerstoff an sämtlichen kathodisch wirkenden Bereichen voraussetzt.

Im Folgenden werden die gängigen Instandsetzungsverfahren für chloridbelasteten Beton näher beschrieben.

### 3.2 Instandsetzungsprinzip Repassivierung des Betons (Verfahren 7.2)

Die Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen erfolgt im Rahmen der konventionellen Instandsetzung durch die Repassivierung des Bewehrungsstahls mittels Prinzip R-Cl bzw. Verfahren 7.2.

Bei diesem Verfahren wird der mit einem kritischen Chloridgehalt belastete Beton mittels mechanischer oder hydromechanischer Verfahren bis hinter die Bewehrung abgetragen, vgl. Abbildung 3-3. Die Instandsetzungsmaßnahme bezieht sich nicht nur auf Bereiche mit aktiver Bewehrungskorrosion, sondern wird in der Regel großflächig eingesetzt. Werden lediglich örtliche Bereiche mit aktiver Korrosion ausgebessert, besteht die Gefahr, dass die Korrosionsinitiierung in vormals kathodisch wirkenden Nachbarbereichen auftritt.

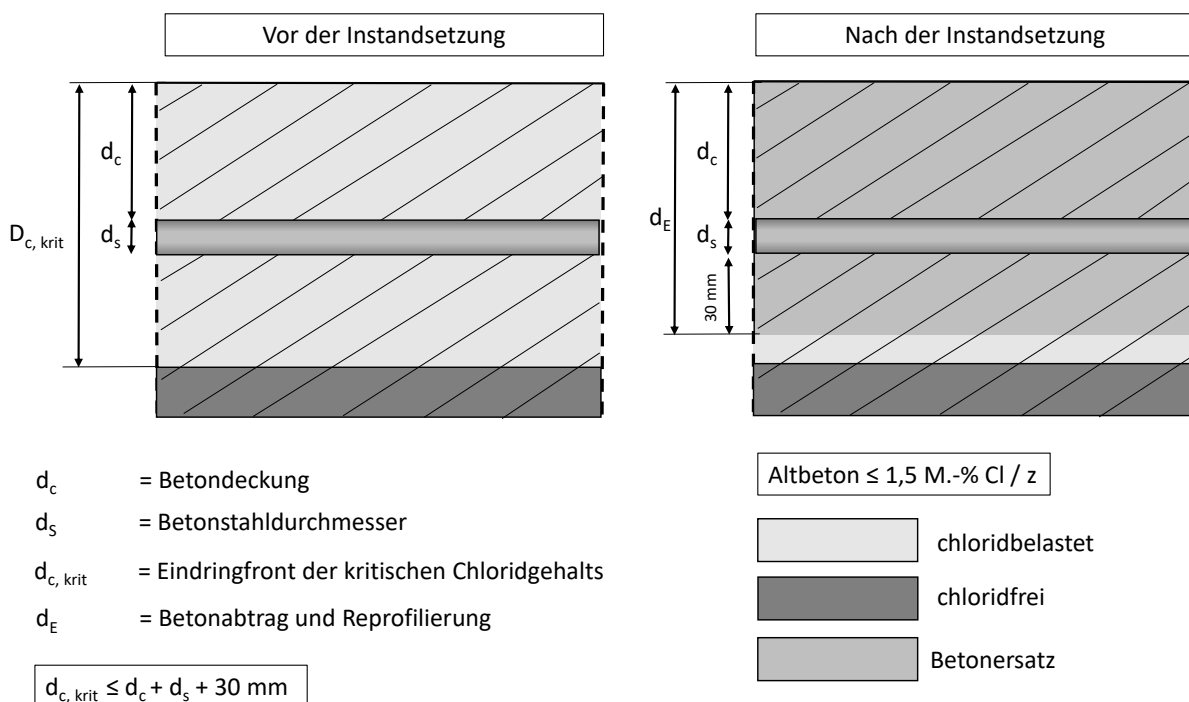


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung Verfahren 7.2 nach TR Instandhaltung [9]

Der Betonabtrag erfolgt bei diesem Instandsetzungsverfahren in der Regel mittels Höchstdruckwasserstrahlen (HDW) mit einem Wasserdruck zwischen 800 bar und 3.000 bar. Das Verfahren ermöglicht einen präzisen, erschütterungs- und emissionsarmen Betonabtrag. Das hierbei entstehende Abwasser muss aufgefangen und gereinigt werden. Ein Nachwaschen der gestrahlten Fläche ist in der Regel

erforderlich [21]. Alternativ können mechanische Verfahren, z. B. mit Abbruchmeißeln eingesetzt werden. Durch die dabei initiierten Gefügestörungen im Betonuntergrund müssen weitere Arbeitsschritte nachgeschaltet werden, z. B. Kugelstrahlen.

Durch den Betonabtrag und die dadurch entstehende Querschnittsreduzierung der Stahlbetonbauteile ist es meist erforderlich, die anfallenden Lasten aus Eigengewicht und Nutzung durch Abstützungsmaßnahmen abzufangen, vgl. Abbildung 3-4. Im Bereich von Bodenplatten im Grundwasser oder bei Wandscheiben mit Erddruck wird häufig ein zeitaufwendiges Pilgerschrittverfahren angewendet.



Abbildung 3-4: Abstützmaßnahmen und Betonabtrag bei Stützeninstandsetzung mittels Verfahren R-CI bzw. Verfahren 7.2; Bild: id+v, Rommel

Die Repassivierung des Bewehrungsstahls erfolgt durch Reprofilierung mittels Instandsetzungsmörtel bzw. -beton, häufig in Kombination mit Haftbrücken und Feinspachtel. Im Rahmen der Instandsetzung wird der Betonersatz im Handauftrag oder im Spritzverfahren eingebracht. Durch den Kontakt der Bewehrung mit alkalischem, chloridfreiem Beton ist diese durch eine eintretende Repassivierung wieder vor Korrosion geschützt. Um ein erneutes Eindringen von Chloriden zu verhindern, wird die Betonoberfläche nach der Reprofilierung und einer erforderlichen Trocknungszeit meist mit einem Oberflächenschutzsystem oder einer Abdichtung geschützt.

Durch den intensiven Eingriff in die Bausubstanz und die dabei häufig erforderlichen statischen Behelfsmaßnahmen ist das Instandsetzungsverfahren in verschiedenen Bundesländern, z. B. Bayern, genehmigungspflichtig, vgl. hier Art. 57 BayBO [22]. Entsprechend ist im Rahmen der Instandsetzungsplanung ein Bauantrag mit den erforderlichen Nachweisen bei den zuständigen Genehmigungsbehörden einzureichen.

Eine weitere Möglichkeit der Repassivierung der Bewehrung stellt der zerstörungsfreie elektrochemische Chloridentzug (Verfahren 7.5 nach EN 1504, nicht in TR-IH geregelt) dar. Bei diesem Verfahren wird über eine Spannungsquelle ein elektrisches Feld zwischen der Bewehrung und einer leitfähigen Kompressen angelegt. In diesem elektrischen Feld wandern die Chloride als Anionen in Richtung

der Anoden und werden schließlich aus dem Beton extrahiert. Verschiedene Autoren [23–25] beschreiben, dass die Grenzzone zwischen Stahl und Beton durch die angelegte Spannung gestört wird und sich dies sowohl auf die Porosität der Grenzfläche als auch auf das Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton negativ auswirkt. Aufgrund der dargestellten Unsicherheiten muss die Wirksamkeit der Instandsetzung in jedem Einzelfall durch einen Sachkundigen Planer nachgewiesen werden. Die Anwendung des elektrochemischen Chloridentzugs begrenzt sich aufgrund der komplexen Umsetzung auf Ausnahmefälle, siehe z. B. [26] und stellt derzeit keine Regellösung für eine Instandsetzungsmaßnahme dar.

### **3.3 Instandsetzungsprinzip Kathodischer Korrosionsschutz (Verfahren 10.1)**

Bei Anwendung des Kathodischen Korrosionsschutzes mit Fremdstrom wird der Korrosionsvorgang der Bewehrung durch Anlegen eines elektrischen Potentials beeinflusst.

Das Verfahren ist in der TR Instandhaltung [9] mit Verweis auf DIN EN ISO 12696:2017 [27] aufgeführt. Durch diese Norm und den entsprechenden Vorgängern wird der kathodische Korrosionsschutz seit dem Jahr 2000 geregelt. Durch das Aufprägen eines Schutzstroms polarisiert die Stahloberfläche kathodisch und verschiebt das elektrochemische Potential des Bewehrungsstahls in negative Richtung in den sog. Immunitätsbereich, in dem eine Eisenauflösung nach [28] unterbunden wird. Eichler zeigt in [29], dass die angelegte Treibspannung neben der kathodischen Polarisation des Stahls zu einer anodischen Polarisation der Anode führt.

Damit der Schutzstrom aufgeprägt werden kann, sind dauerhafte, korrosionsresistente Anoden (z. B. Titanmischoxidanoden Ti/MMO) mit dem Beton elektrolytisch zu verbinden. Dies geschieht über Bandanoden, vgl. Abbildung 3-5, die mittels eines zementösen Mörtels an den Bestandsbeton angekoppelt werden. Die Leitfähigkeit des Ankopplungsmörtels soll hierbei der Leitfähigkeit des Bestandsbetons entsprechen.



Abbildung 3-5: Einbau Bandanoden bei Tiefgarageninstandsetzung mittels Instandsetzungsprinzip KKS bzw. Verfahren 10.1, Bild: id+v, Becker

Die Anoden werden in sogenannten Schutzzonen zusammengefasst und über Primäranoden mit dem Pluspol der externen Spannungsquelle verbunden. Die Bewehrung wird mit dem Minuspol des Gleichrichters verbunden, vgl. Abbildung 3-6. Zur Funktionsüberwachung werden in die Schutzzone Referenzelektroden, in der Regel  $\text{MnO}_2$ -Elektroden [30; 31], eingebaut.

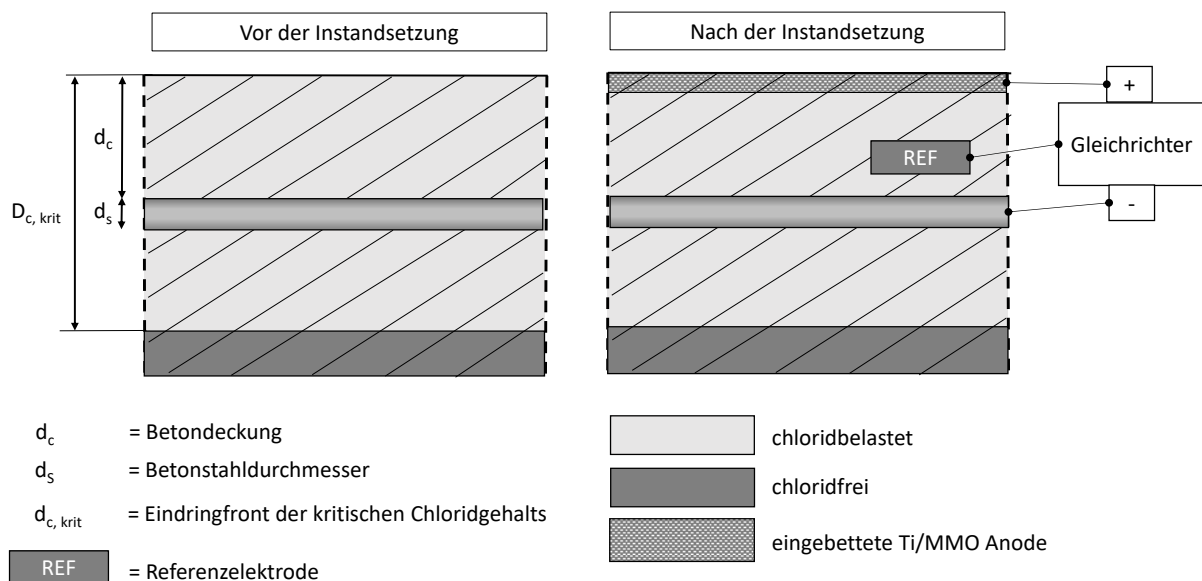


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung Verfahren 10.1 in Anlehnung an die Darstellungsform in [9]

Der hinreichende kathodische Schutz und damit das Erreichen des Instandsetzungsziels wird über das Erreichen von Schutzkriterien nachgewiesen. Nach DIN EN ISO 12696:2017 [27] muss für den Nachweis der Schutzwirkung eines der folgend genannten Kriterien erfüllt werden.

- Ausschaltpotential  $< 500$  mV gegen die Standardwasserstoffelektrode,
- 24 Stunden Kriterium: Depolarisation innerhalb von 24 Std.  $> 100$  mV,

- 7 Tage Kriterium: Depolarisation innerhalb von 7 Tagen > 150 mV.

Neben dem dargestellten Instandsetzungsverfahren KKS mit Fremdstrom existieren noch weitere Formen von KKS, bei denen keine Fremdstromquelle eingesetzt wird. Diese werden hauptsächlich zum Schutz von unterirdischen Behältern, Stahlbauten im Meerwasser und Schiffsrümpfen verwendet. Im Stahlbetonbau werden diese galvanischen Anodensysteme derzeit eher als Nischenprodukte in Form von Spritzverzinkung oder auch Zinkanoden verwendet.

### **3.4 Instandsetzung durch Absenkung des Wassergehalts und Verringerung der elektrolytischen Leitfähigkeit (Verfahren 8.3)**

#### **3.4.1 Allgemeines**

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, kann chloridinduzierte Makrokorrosion vereinfacht in einem Ersatzschaltbild dargestellt werden. Dabei ist der Korrosionsstrom  $i_{\text{kor}}r$  eine Größe für die korrodierende Eisenmenge über die Zeit und, bei einer bekannten Anodenfläche, auch ein Maß für den zeitlichen Querschnittsverlust an der Bewehrung.

Der Korrosionsstrom  $i_{\text{kor}}r$  wird dabei von den Geschwindigkeiten der ablaufenden Teilprozesse bestimmt. Hierzu zählen die anodische und kathodische Teilreaktion sowie der Ionentransport in dem den Stahl umgebenden Beton zwischen anodischen und kathodischen Oberflächenbereichen. Ein Maß für den Ionentransport stellt dabei die Leitfähigkeit des Betons und der spezifische Elektrolytwiderstand des Betons dar. Die Aktivität der anodischen und der kathodischen Teilreaktion wird durch den anodischen Polarisationswiderstand  $R_{p,a}$  und den kathodischen Polarisationswiderstand  $R_{p,k}$  beschrieben. Als Treibspannung in diesem System wirkt die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode ( $E_{R,K} - E_{R,A}$ ), die sich aufgrund des Potentialabfalls an der Anode infolge des Verlusts der Passivität einstellt. Der Eigenkorrosionsanteil  $i_{\text{Eigen}}$  an der Anode kann bei Messung der Elementströme durch Trennung von Anode und Kathode versuchstechnisch nicht erfasst werden.

Wie aus Gleichung 2-1 abgeleitet werden kann, ist eine Verringerung der Reaktionskinetik (ausgedrückt als  $i_{\text{kor}}r$ ) u. a. durch eine Erhöhung der Teilwiderstände möglich. Hier setzt das Verfahren 8.3 an. Durch die Erhöhung des elektrolytischen Betonwiderstands soll der Ionentransport im Beton soweit verlangsamt werden, dass der Korrosionsstrom auf ein unschädliches Maß reduziert wird. Diese Erhöhung des Betonwiderstands soll durch eine signifikante Reduktion des Feuchtegehalts des Betons erreicht werden. Hierfür muss eine direkte Wasseraufnahme des Betons durch eine Beschichtung (Oberflächenschutzsystem) unterbunden werden. Die Austrocknung kann über die unbeschichtete Rückseite von Innenbauteilen oder idealerweise durch ein wasserdampfdiffusionsoffenes Oberflächenschutzsystem auf der Betonoberfläche erfolgen, vgl. hierzu Abschnitt 3.4.4.

### 3.4.2 Bisherige Untersuchungen zum Verfahren 8.3

Umfangreiche Untersuchungen zu den Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsprinzips W-Cl wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen im Jahr 2009 [32] durchgeführt. Hierbei konnte an Mörtelprobekörpern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen (CEM I und CEM III A, w/z = 0,55 bis 0,7) eine erhebliche Reduktion der Korrosionsstromdichte an unbeschichteten Stahlbetonbauteilen bei Chloridgehalten von 2 M.-%/z durch die Erhöhung des Elektrolytwiderstands gezeigt werden. Die gemessenen Elementstromdichten (bezogen auf die Gesamtoberfläche des korrodierenden Stabes) nach einer Lagerung von 200 Tagen bei 20 °C/50 % r. F. lagen im Mittel um den Faktor zehn unter der Ausgangselementstromdichte. Die Passivstromdichten wurden im Rahmen dieses Messsettings nicht erreicht. Die mittels der Boundary Element Methode (BEM) simulierte Korrosionsaktivität der Prüfkörper zeigte gute Übereinstimmung mit den im Labor gemessenen Elementströmen. Nur die gemessenen Elementströme von drei Prüfkörpern (alle CEM III, w/z = 0,55) lagen deutlich unter denen, die mit BEM simuliert wurden. Hier kann ein zunehmender Einfluss der anodischen Steuerung der Korrosionsaktivität abgeleitet werden.

In [33] wird anhand eines Praxisbeispiels das Austrocknungsverhalten eines gut belüfteten Parkhauses über die Messung des tiefengestaffelten Elektrolytwiderstands durch die Verwendung von sogenannten Multiring-Elektroden gezeigt. Der Aufbau und die Konzeption von Multiring-Elektroden ergibt sich z. B. aus [34]. Die untersuchten Stahlbetonbauteile wurden hierbei trotz eines erhöhten Chloridgehalts mit einem Oberflächenschutzsystem beschichtet. Anhand der zeitlichen Widerstandsverläufe konnte gezeigt werden, dass die elektrolytischen Widerstände des Betons auch noch im Zeitraum von 7 bis 14 Jahren nach der Applikation deutlich steigen. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Austrocknung des Betons nur sehr langsam abläuft, aber im Laufe der Zeit zu nennenswerten Austrocknungsgraden führt. Teilweise wurde nach 14 Jahren Austrocknung die obere Messbereichsgrenze der verwendeten Messelektronik von 100 kΩ erreicht, was einem spezifischen Elektrolytwiderstand von rd. 10.000 Ωm und damit vernachlässigbaren Korrosionsaktivitäten nach RILEM [35] entspricht.

In einem Praxisbericht von Lay [36] konnte ferner gezeigt werden, dass sich die Treibspannung nach der Instandsetzung mittels Verfahren 8.3 um den Faktor 3 reduzierte, was entsprechend Gleichung 2-1 ebenfalls zu einer Reduktion des Korrosionsstroms  $i_{\text{kor}}$  führen würde. Als ursächlich für die Abnahme der Treibspannung wurde hierbei der Ionentransport ins Bauteilinnere und die damit verbundene Abnahme des Chloridgehalts an der Bewehrung identifiziert.

Brem [37] konnte zeigen, dass durch Auslagerung von chloridbelasteten Mörtelprobekörpern mit aktiver Bewehrungskorrosion in Klimaten mit geringer relativer Luftfeuchte die Elementstromdichte reduziert werden kann. Die hierbei ermittelten Stromdichte-Potential-Kurven in Abbildung 3-7 zeigen für ein trockenes Klima mit 66 % r. F. eine signifikante Abnahme der maximalen Korrosionsstromdichten in den Polarisationsversuchen.

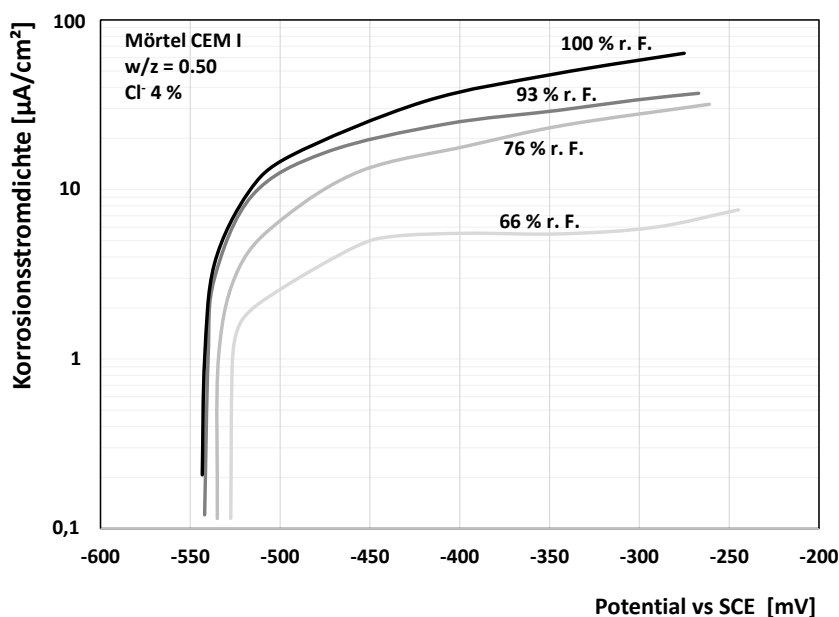


Abbildung 3-7: Einfluss der Luftfeuchte auf die anodische Stromdichte-Potentialkurve von Stahl in chloridhaltigem Mörtel (logarithmische Skalierung) [37]

Einen Sonderfall stellt die chloridinduzierte Korrosion im Rissbereich von Beton dar. Untersuchungen von Hiemer und Keßler [38; 39] zum Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Bewehrungskorrosion in jungem, gerissenem Beton haben gezeigt, dass bei geringen Chloridgehalten nicht der spezifische Elektrolytwiderstand des Betons der dominante Teilprozess ist, sondern der anodische Teilprozess. Auch wenn diese Anwendung einen Sonderfall des Instandsetzungsprinzips Verfahren 8.3 darstellt, deuten Ergebnisse aus [32] ebenfalls darauf hin, dass auch im ungerissenen Bereich zusätzlich zur Erhöhung des elektrischen Widerstands eine anodische Steuerung vorliegt.

Generelle Untersuchungen zur Auswirkung einer Erhöhung des Elektrolytwiderstands auf die Korrosionsaktivität außerhalb eines Instandsetzungskontexts wurden von einer Vielzahl von Autoren durchgeführt. Die grundlegenden Erkenntnisse und Literaturverweise werden dabei in Abschnitt 4.3 und Abschnitt 4.4 gegeben.

### 3.4.3 Umsetzung des Verfahrens 8.3

Das Verfahren 8.3 ist in dem aktuellen Regelwerk der TR Instandhaltung [9] als Instandsetzungsverfahren enthalten. Die Anwendbarkeit ist allerdings eingeschränkt. So obliegt die Einschätzung einem Sachkundiger Planer, ob eine ausreichende Austrocknung des Bauteils bei Chloridgehalten über 1 M.-%/z erreicht werden kann. Auch bei bekanntem Chloridgehalt ist die Korrosionsaktivität des Bewehrungsstahls von zahlreichen Parametern wie Betonqualität, Umgebungsbedingungen und



Geometriefaktoren abhängig. Entsprechend schwierig ist es, einen scharf definierten Grenzwert für den maximalen Chloridgehalt im Altbeton anzugeben. So ergibt sich aus der TR Instandhaltung ein deutlicher Warnhinweis:

*„Bei hohen Chloridgehalten ist eine ausreichende Austrocknung des Bauteils in der Regel nicht mehr zu erwarten. Daher darf dieses Verfahren bei chloridkontaminiertem Beton nur angewendet werden, wenn nach der Ausführung der Instandsetzungsmaßnahme die Auswirkung auf den Korrosionsfortschritt der Bewehrung, z. B. durch Einbau geeigneter Sensoren, von einem Sachkundigen Planer über die Restnutzungsdauer überprüft wird.“*

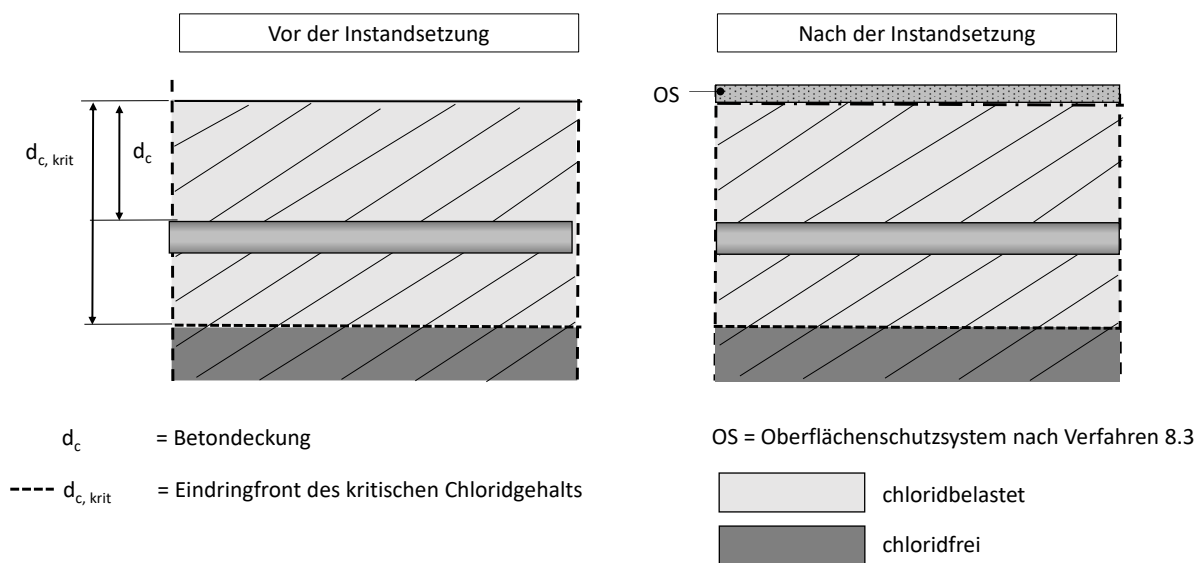


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung Verfahren 8.3 nach [9]

Die in der Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb [8] geforderte Probeinstandsetzungen an Referenzflächen bzw. -bauteilen vor Ausführung der Instandsetzungsmaßnahme wird im neuen Regelwerk hingegen nicht mehr gefordert.

Nach vorliegenden wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnissen ist die Anwendung des Verfahrens bei Chloridgehalten von bis zu 1 M.-%/z jedoch erfolgversprechend [40]. Für Chloridgehalte ab etwa 2 M.-%/z hingegen wird das technische Risiko des Verfahrens 8.3 so hoch eingeschätzt, dass es als „nicht tauglich und nicht funktionsfähig“ eingestuft wird. Dazwischen obliegt es dem Sachkundigen Planer, die Gegebenheiten auf Basis einer umfangreichen Bauzustandsanalyse und sonstiger Randbedingungen zu bewerten. Abbildung 3-8 zeigt die vorgenannten Anforderungen schematisch.

### 3.4.4 Oberflächenschutzsysteme bei der Instandsetzung mit Verfahren 8.3

Der Schutz des Stahlbetons vor einem weiteren Eintrag korrosiver Medien sowie das Verhindern einer weiteren Feuchteaufnahme bei gleichzeitiger Austrocknung über den Betonquerschnitt kann für das Instandsetzungsprinzip 8 über die Applikation von Oberflächenschutzsystemen (OS-Systeme) realisiert werden. Hierbei ist grundsätzlich die Anwendung der folgenden Oberflächenschutzsysteme möglich [41]:

- Hydrophobierung
- Versiegelung
- Beschichtungssystem.

Hydrophobierungen sind dabei nicht filmbildend und von ihrer Dauerhaftigkeit zeitlich begrenzt [42]. Diese dürfen unter bestimmten Randbedingungen nur bei carbonatisierungsinduzierter Korrosion im Rahmen des Instandsetzungsprinzips 8 (Verfahren 8.1) eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den Hydrophobierungen bestehen Versiegelungen aus einem dünnen Anstrich auf der Betonoberfläche. Aufgrund der Unregelmäßigkeiten des Betonuntergrunds mit Lunkern und Poren führen Versiegelungen mit Schichtdicken bis 0,3 mm in der Regel zu keinem geschlossenen Film über dem Beton und unterbinden das Eindringen von Gasen und Flüssigkeiten nur bedingt. Entsprechend sind Versiegelungen für die Anwendung im Instandsetzungsprinzip 8 ungeeignet.

Einen geschlossenen Film bilden Beschichtungssysteme mit Schichtdicken > 0,3 mm, wobei hier vor dem Aufbringen der hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschicht (hwO) eine Grundierung oder Kratzspachtelung zum Poren- und Lunkerschluss im Systemaufbau vorgesehen ist. Der TR Instandhaltung [9] folgend sind für das Verfahren 8.3 die Verwendung von Betonbeschichtungen mit Schichtdicken > 0,3 mm und einem flächigen Poren- und Lunkerschluss vorzusehen. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 3-1 dargestellten Oberflächenschutzsysteme für das Instandsetzungsverfahren 8.3.

Tabelle 3-1: Nach TR-IH zugelassene Oberflächenschutzsysteme für die Instandsetzung nach Verfahren 8.3

Klasse des OS-Systems	Kurzbeschreibung und Anwendungsbereich	Mindestschichtdicke hwO
[-]	[-]	[µm]
OS 4 <sup>1)</sup>	Beschichtung mit Kratz- bzw. Ausgleichspachtelung für nicht befahrbare, rissfreie Flächen, bei Tausalzbeanspruchung	80
OS 5	Beschichtung mit geringen rissüberbrückenden Eigenschaften für nicht befahrbare, rissfreie Flächen, bei Tausalzbeanspruchung	300 <sup>1) 2)</sup> 2000 <sup>3)</sup>

Klasse des OS-Systems	Kurzbeschreibung und Anwendungsbereich	Mindestschichtdicke hwO
[-]	[-]	[ $\mu\text{m}$ ]
OS 8	Starre Beschichtung für mechanisch stark belastete Flächen	2500
OS 10 /14 <sup>6)</sup>	Beschichtung als Dichtungsschicht mit hoher Rissüberbrückung unter Schutz oder Deckschichten für begeh- und befahrbare Flächen	2000 + Verschleißschicht nach abP
OS 11	Beschichtung mit erhöhter Rissüberbrückungsfähigkeit für begeh- und befahrbare Flächen	4500 <sup>4)</sup> 4000 <sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> In der aktuellen Fassung des Merkblatts Parkhäuser und Tiefgaragen von 2018 nicht mehr enthalten

<sup>2)</sup> OS 5a: hwO Polymerdispersion

<sup>3)</sup> OS 5b: hwO Polymer-Zementgemisch

<sup>4)</sup> OS 11a: zweischichtige hwO bestehend aus Dichtungsschicht und Verschleißschicht

<sup>5)</sup> OS 11 b: einschichtige hwO bestehend aus flexibilisierter Verschleißschicht

<sup>6)</sup> nach TR Instandhaltung OS 14 mit materialspezifischen Schichtdicken

Die Auswahl des Beschichtungssystems ergibt sich aus den projektspezifischen Anforderungen. So wird zwischen „nicht begeh- und befahrbaren Systemen“ für vertikale Bauteile wie Wand- und Stützensockel und „begeh- und befahrbaren Systemen“ für horizontale Bauteile wie Bodenplatten und Zwischendecken unterschieden. Als weitere Kriterien sind die Rissüberbrückungsfähigkeit und die Verschleißneigung des Oberflächenschutzsystems ein entscheidendes Merkmal für die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit einer Beschichtung. Für das Verfahren 8.3 ist die Wasserdampfdurchlässigkeit des Systems und damit die Möglichkeit einer Austrocknung durch das Beschichtungssystem je nach Anwendung eine ebenfalls entscheidende Kenngröße. Der Transport der Feuchtigkeit durch die Beschichtung erfolgt dabei sowohl im mikroporösen Bereich der Beschichtung über Wasserdampfdiffusion als auch über Lösungsdiffusion durch Adsorption auf der dem Beton zugewandten Beschichtungsseite. Durch die polare Ausrichtung des Wassermoleküls ergibt sich in Bindemitteln mit ebenfalls polaren Molekülstrukturen ein Transportvorgang durch Solvation sowie intermizellare und intramizellare Quellung [42]. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand einer Beschichtung wird über die äquivalente Luftschichtdicke  $s_D$  charakterisiert und wird nach den Regelwerken [8; 20] gemäß DIN EN ISO 7783 [44] ermittelt. Gemäß DIN EN 1504-2 [45] ergeben sich die in Tabelle 3-2 dargestellten Wasserdampf-Durchlässigkeitsklassen.

Tabelle 3-2: Klassen der Wasserdampf-Durchlässigkeit nach [45] und Zuordnung von OS-Systemen nach Untersuchungen von Weydert [46] bzw. gemäß produktspezifischer Herstellerangabe

Diffusions- klasse	Anforderung	Bewertung	Oberflächenschutzsysteme
[-]	[m]	[-]	[-]
Klasse I	$s_D < 5$	wasserdampfdurchlässig	OS 4, OS 5
Klasse II	$5 \leq s_D \leq 50$	wasserdampfbremsend	OS 8 <sup>1)</sup>
Klasse III	$s_D > 50$	wasserdampfundurchlässig	OS 8, OS 10, OS 11, OS 14 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Vereinzelte OS 8-Systeme werden mit einem  $s_D$ -Wert  $< 50$  beschrieben

<sup>2)</sup> Herstellerangaben

Für carbonatisierte Betone empfiehlt die TR Instandhaltung [9] in trockenen Umgebungsbedingungen ein diffusionsoffenes Beschichtungssystem der Klasse I. Bei diffusionsdichten Beschichtungssystemen der Klasse II und Klasse III ist der Beton vor der Beschichtung auszutrocknen. Für chloridbelastete Bauteile ist diese Unterscheidung zum derzeitigen Stand des Regelwerks nicht enthalten. Eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Diffusionsklassen der Beschichtungssysteme für das Austrocknen chloridbelasteter Bauteile in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

### 3.4.5 Rechtliche Bewertung des Instandsetzungsprinzips Verfahren 8.3

Der Planer einer Instandsetzung schuldet dem Bauherrn den Werkerfolg. Es muss so geplant werden, dass die Instandsetzung risikoarm und dauerhaft ist. Dabei bilden die „Anerkannten Regeln der Technik“ eine zuverlässige Vertrauensgrundlage zur Sicherstellung der Qualität von Bauleistungen [47] und begrenzen damit das mit der Instandsetzungsmaßnahme verbundene Risiko.

Herkömmliche Instandsetzungen, dazu ist mittlerweile auch das Instandsetzungsprinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes zu zählen, sind wissenschaftlich begründet und werden „von einer Mehrheit der anerkannten Fachleute“ als technisch richtig und praktisch umsetzbar eingestuft. Sie sind, bei richtiger Planung und Ausführung, mit einem geringen technischen Risiko verbunden und können den „Anerkannten Regeln der Technik“ zugeordnet werden.

Dagegen sind die Anwendungsgrenzen für das Verfahren 8.3 deutlich schwieriger zu definieren. So wird das Verfahren in den Regelwerken an Bedingungen geknüpft, siehe Abschnitt 3.4.3. Die Regelwerke überlassen einen wesentlichen Anteil der Verantwortung dem Sachkundigen Planer und geben hierbei, durch die Nennung von

Anwendungsbereichen, einen ordnenden Rahmen, in dem der derzeitige Kenntnisstand aus der Wissenschaft festgeschrieben wird.

Entsprechend kommt dem Sachkundigen Planer bei der Anwendung des Verfahrens 8.3 eine übergeordnete Rolle zu. In Anlehnung an [47] hat der Sachkundige Planer in den Leistungsphasen 1 bis 3 nach HOAI den Auftraggeber über die verschiedenen Instandsetzungsmöglichkeiten aufzuklären und eine Festlegung des Auftraggebers herbeizuführen, welches Instandsetzungsprinzip verwirklicht werden soll. Hierbei muss der Auftraggeber darüber aufgeklärt werden, dass gerade bei höheren Chloridgehalten und Anwendung des Verfahrens 8.3 der geschuldete Instandsetzungserfolg nicht erreicht werden kann und ein deutlich erhöhtes Risiko einer erneuten Instandsetzung besteht.

### **3.4.6 Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des Verfahren 8.3**

Als großer Vorteil gegenüber anderen Instandsetzungsvarianten erscheinen beim Verfahren 8.3 die geringen Instandsetzungskosten in Verbindung mit einem geringen Instandhaltungsaufwand. Im Idealfall müssen lediglich die Kosten für das Oberflächenschutzsystem inklusive der damit verbundenen Arbeiten wie Untergrundvorbereitung und die Kosten für Installation und Überwachung eines Korrosionsmonitoringsystems aufgewendet werden. Bei den Beschichtungskosten handelt es sich dabei um „Sowieso-Kosten“, die auch im Rahmen einer konventionellen Instandsetzung oder auch bei einer Instandsetzung mittels KKS anfallen. Die Kosten des Monitorings ergeben sich in einer vergleichbaren Größenordnung wie Monitoringkosten, die im Rahmen einer KKS-Instandsetzung anfallen. Die kostenintensiven Maßnahmen wie Bauteilabstützungen und der Betonabtrag beim Verfahren 7.2 oder das aufwendige Verlegen der Anodenbänder und die teure Anlagentechnik beim KKS entfallen bei dem Verfahren 8.3.

Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde ein fiktives Fallbeispiel einer Tiefgarageninstandsetzung gewählt, siehe Anhang A. Die hierfür herangezogene Tiefgarage wird in [48] beschrieben, das für den Vergleich gewählte Schädigungspotential ergibt sich aus Anhang A. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden folgende Instandsetzungsverfahren untersucht:

- Instandsetzungsvariante Verfahren 7.2
- Instandsetzungsvariante Verfahren 10.1
- Instandsetzungsvariante Verfahren 8.3 (komplett)
- Instandsetzungsvariante Verfahren 7.2/Verfahren 8.3 (Mischvariante).

Der Variante Verfahren 8.3 (komplett) liegt die Annahme zugrunde, das Instandsetzungsverfahren an allen chloridexponierten Bauteilen der Tiefgarage anwenden zu können. Allerdings zeigt sich in einer real genutzten Tiefgarage in der Regel ein sehr differenziertes Schädigungsbild. Entsprechend ist es lediglich ein theoretischer Ansatz, davon auszugehen, dass sämtliche Stahlbetonbauteile mittels Verfahren 8.3 instandgesetzt werden können. Vielmehr ist davon auszugehen, dass

das Verfahren 8.3 nur an einem Teil der Stahlbetonbauteile angewendet werden kann und geschädigte Bauteile oder Bauteile mit einem hohen Schädigungsgrad, vgl. hier Abschnitt 3.4.2 und Abschnitt 3.4.3, durch andere Maßnahmen instand zu setzen sind. Hier erscheint der Einsatz des Verfahrens 7.2 in Kombination mit Verfahren 8.3 als eine zielführende und praxisnähere Variante.

Die Kostenschätzung für die unterschiedlichen Instandsetzungsvarianten, dargestellt in Abbildung 3-9, zeigt, dass die Kosten bei der Instandsetzung nach Verfahren 8.3 um den Faktor 1,9 bis 2,4 geringer sind als bei einer herkömmlichen Instandsetzung. Im Vergleich zu einer KKS-Instandsetzung liegt die Kosteneinsparung in einem Bereich von Faktor 1,8 und 2,2. Die Ergebnisse decken sich gut mit der wirtschaftlichen Betrachtung von [36] und [49].

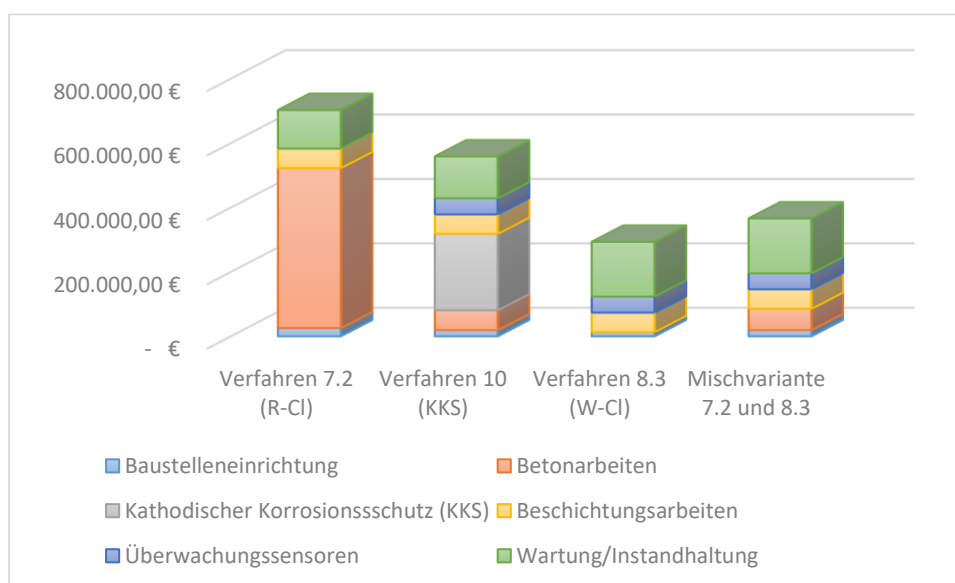


Abbildung 3-9: Kostenvergleich von Instandsetzungsprinzipien anhand eines Fallbeispiels

Grundvoraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz des Instandsetzungsverfahrens 8.3 ist die nachweisliche Wirksamkeit des Verfahrens. Kann über das eingebaute Monitoringsystem der gewünschte Instandsetzungserfolg (hinreichende Hemmung der Korrosionsraten) nicht nachgewiesen werden, muss zur Sicherstellung der Lebensdauer eine weitere Instandsetzung mittels Verfahren 7.2 oder Verfahren 10 erfolgen, mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Instandsetzungskosten.

### 3.4.7 Offene Fragestellungen zur Anwendung des Verfahrens 8.3

Um das Instandsetzungsverfahren 8.3 risikoarm anwenden zu können, muss die Wirkungsweise des Verfahrens grundsätzlich bekannt sein. Die zentrale Frage ist dabei, wie sich das Korrosionsverhalten des Stahls in einem langsam austrocknenden, beschichteten Betonbauteil entwickelt, und welche Lebensdauer

sich daraus für das instand gesetzte Bauteil prognostizieren lässt. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die konzentrationsabhängige Umlagerung der Chloridionen vom Äußeren des Bauteils in das Bauteilinnere zu einem instationären Schädigungspotential an der Bewehrung führen kann. Aus der Literatur lässt sich die Frage der Wirksamkeit derzeit nicht abschließend klären. Entsprechend richtet sich der Fokus dieser Arbeit auf die wichtigen materialspezifischen Kenngrößen, die für die Wirkungsweise des Verfahrens 8.3 von entscheidender Bedeutung sind, vgl. hierzu Abschnitt 2.1. Die Randbedingungen, unter denen das Verfahren 8.3 mit Erfolg durchgeführt werden kann, sollen entsprechend weiter präzisiert werden. Bleiben diese Randbedingungen unberücksichtigt, ist die Anwendung des Prinzips auch unter Beachtung der neuesten Ergebnisse mit einem erhöhten technischen Risiko verbunden und durch einen Sachkundigen Planer zu vertreten. Chloridumverteilungsmechanismen, die über die Lebensdauer zu einer Reduzierung des Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung führen können, bleiben bei der hier vorgestellten Arbeit unberücksichtigt. Die Auswirkung der Chloridumverteilung auf die Bewehrungskorrosion bei Verfahren 8.3 wird z. B. in [50] behandelt.

## 4 Materialspezifische Grundlagen

### 4.1 Allgemeines

Zur Einordnung des Verfahrens 8.3 wurde in Kapitel 3 die Technologie der derzeit baupraktisch relevanten Instandsetzungsverfahren dargestellt sowie die Vor- und Nachteile der Verfahren erläutert.

In Kapitel 4 werden nun folgende materialspezifischen Grundlagen des Betons erläutert, um die in der Fragestellung aufgeworfenen Themengebiete zu behandeln:

- Feuchtehaushalt von Beton
- Leitfähigkeit bzw. elektrolytischer Widerstand von Beton
- Korrosion von Stahl in Beton.

### 4.2 Feuchtehaushalt von Beton

#### 4.2.1 Allgemeines

Beton ist ein heterogener, poriger Verbundbaustoff aus Gesteinskörnung, Zementstein und zum Teil Betonzusatzstoffen wie Kalksteinmehl, Flugasche oder Silikastaub. Bei der Betonherstellung bildet sich während der Hydratation aus einer Reaktion zwischen dem Wasser und dem Zement das sogenannte Zementgel. Die Porenstruktur dieses Zementgels wird als porös beschrieben und zeigt sich unter dem Rasterelektronenmikroskop als struktureller Aufbau spitznadeliger CSH-Phasen, vgl. Abbildung 4-1.

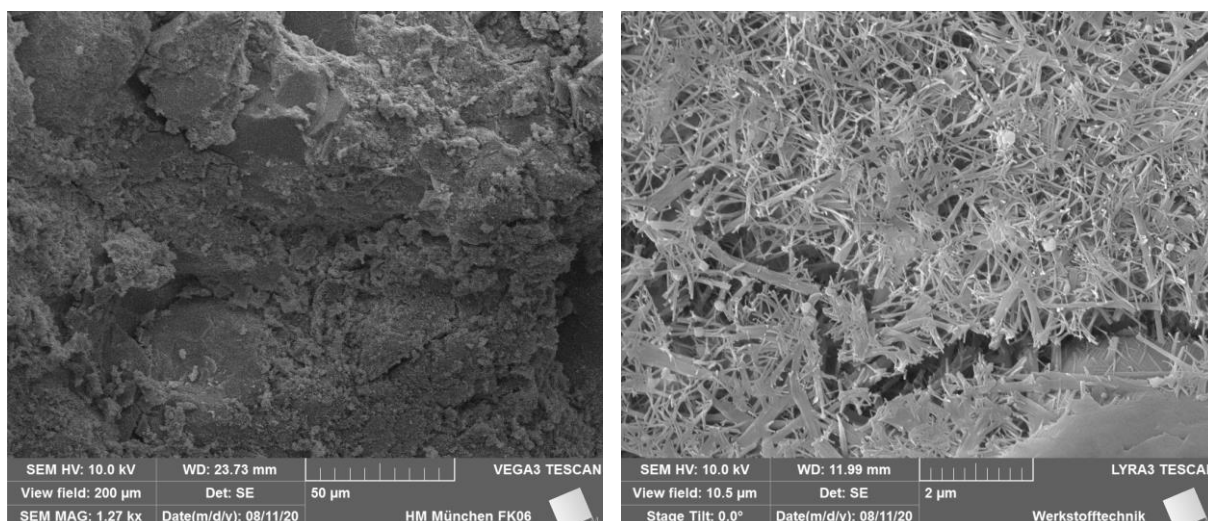


Abbildung 4-1: CSH-Phasen eines CEM I-Betons mit einem w/z-Wert von 0,5 (eigene Darstellung)



Maßgeblich lassen sich in der Struktur des Zementgels Kapillarporen (50 nm bis 50 µm) und Gelporen (< 50 nm) feststellen, wobei der Anteil der Kapillarporen von dem Wasserbindemittelwert des Betons abhängt. In Abhängigkeit von der Verdichtungsenergie sind in der Regel Luftporen und Verdichtungsporen vorhanden. Ferner kann die Gesteinskörnung noch Poren aufweisen. Aufgrund der sehr feingliedrigen Porenstruktur ergibt sich eine innere Oberfläche des Zementsteins zwischen 100 m<sup>2</sup>/g und 600 m<sup>2</sup>/g [51]. Durch diese Porenstruktur ist Beton in der Lage, Feuchtigkeit aus der Luft oder in flüssiger Phase aufzunehmen. Betonzusatzstoffe wie Flugasche oder Hüttensande verändern das Porengefüge und können sich so auf die Wasseraufnahme auswirken [52].

#### 4.2.2 Sorptionsverhalten von Beton

Die Feuchtigkeit von porösen Baustoffen mit einer hohen Oberflächenenergie, wie Beton, ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Diese streben mit der wasserdampfhaltigen Luft in Abhängigkeit vom Wasserdampfpartialdruck einen thermodynamischen Gleichgewichtszustand, die sogenannte Ausgleichsfeuchte, an. Hierbei werden Wassermoleküle aus der Umgebung durch van der Waals'sche Anziehungskräfte zunächst einlagig, dann mehrlagig an der Porenwandung sorptiv gebunden. [53; 54]. Durch die Dampfdruckerniedrigung über konkav gekrümmten Flächen, kommt es in den kleinen Poren bis 1 µm zur Kapillarkondensation, wodurch dort das Wasser ausfällt. Die größeren Poren werden erst bei wachsender Luftfeuchte sukzessive gefüllt. Unter dem Begriff der Sorption werden diese Eigenschaften der Wasseraufnahme zusammengefasst. Der mathematische Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und dem gefüllten Porenradius kann vereinfacht mit der Gleichgewichtsbedingung von Kelvin und Thomsen, vgl. Gleichung 4-1, [55; 56] dargestellt werden.

$$\varphi = \exp \left[ \frac{-2\sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho_w \cdot R_D \cdot T} \right] \quad \text{Gleichung 4-1}$$

$\varphi$	relative Luftfeuchte	[-]
$\sigma$	Oberflächenspannung des Wassers	[N/m]
$\theta$	Randwinkel	[grad]
$r$	Kapillarradius	[m]
$\rho_w$	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$R_D$	Gaskonstante für Wasserdampf	[Nm/kgK]
$T$	absolute Temperatur	[K]

Ab relativen Luftfeuchten von etwa 20 % [56] ist die Oberfläche der Poren mit einem geschlossenen, monomolekularen Wasserfilm bedeckt. Mit der weiteren Zunahme der Luftfeuchte bilden sich multimolekulare Schichten. Bei Luftfeuchten zwischen 50 % [53; 56] und 60 % [52] relativer Feuchte kann es aufgrund von Kapillarkondensation in kleinen Porenräumen zu einer deutlichen Feuchteaufnahme

kommen. Rose zeigt in [58] die modellhafte Darstellung der Porenfüllung über insgesamt vier Phasen im Rahmen der adsorptiven Wasseraufnahme, vgl. Abbildung 4-2. Hierbei zeigen sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Phase unterschiedliche Transportmechanismen. Meng [59] definiert als feuchtetransportrelevantes Porengrößenkriterium den sogenannten Porenfraktionsradius.

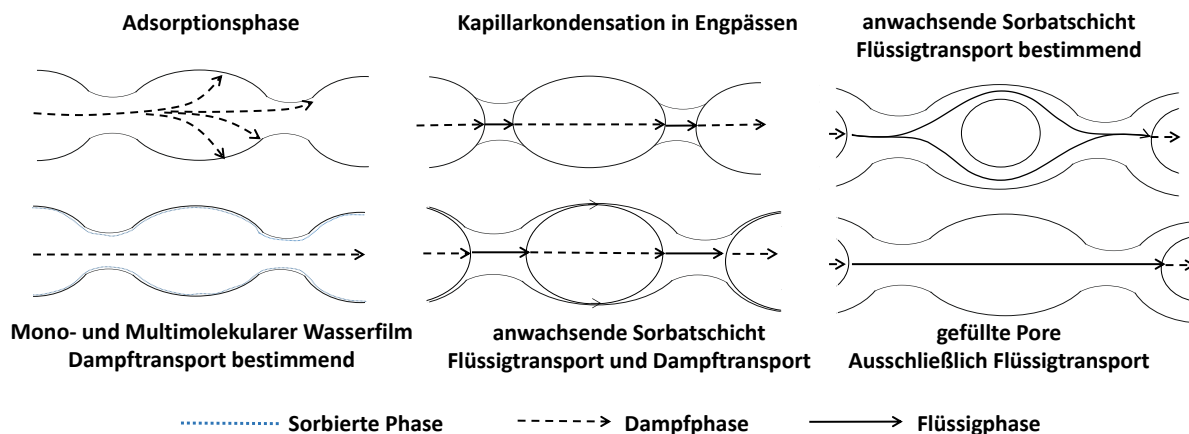


Abbildung 4-2: Unterschiedliche Porenfüllgrade und Feuchtetransport in vier Phasen nach Rose [58]

Fagerlund beschreibt in [60] und [61] für die Feuchtespeicherung in Beton folgende Bereiche:

- hygroskopischer Bereich
- überhygroskopischer Bereich
- Übersättigungsbereich.

In Anlehnung an Rose [58] und Kießl [62] können diese Bereiche der entsprechenden Porenbelegung und dem Porenradius zugeordnet werden. Bei relativen Luftfeuchten ab 95 % steigt der Feuchtegehalt aufgrund von Kapillartransporten in Folge von Saugspannungen bis zum Erreichen der freien Wassersättigung  $U_f$  deutlich an. Unter natürlichen Bedingungen kann dieser Wert als der obere Grenzwert der Wassersättigung begriffen werden. Das noch vorhandene nicht belegte Porenvolumen kann nur durch eine sehr lange Unterwasserlagerung unter Lösungsprozessen der eingeschlossenen Luft oder durch äußere Drücke und Vakuum gefüllt werden. Dieser Bereich wird als Übersättigungsbereich bezeichnet und hat keine baupraktische Bedeutung.

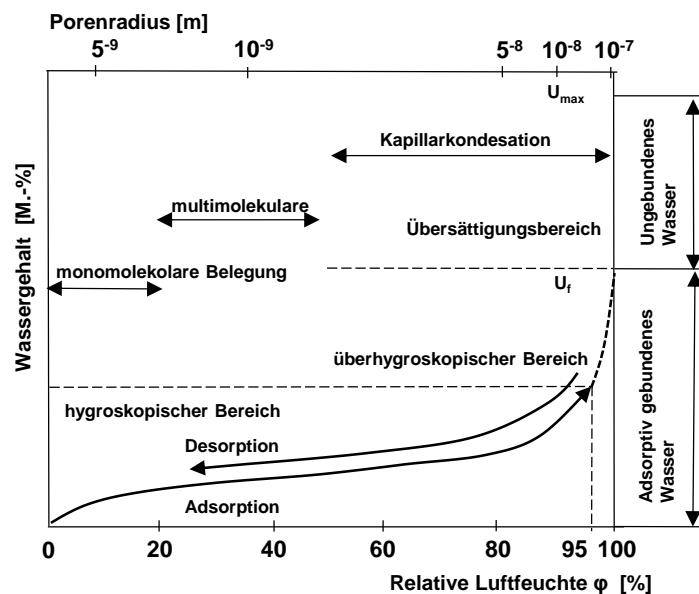


Abbildung 4-3: Darstellung von Sorptionsisothermen schematisch, in Anlehnung an [60–62]

Trotz der theoretischen Temperaturabhängigkeit der relativen Luftfeuchte zeigt sich der Verlauf der Sorptionsisotherme von Beton im baupraktischen Bereich weitgehend temperaturunabhängig [63]. Entsprechend hängt die Feuchtespeicherfunktion maßgeblich von der Porengeometrie und der inneren Oberfläche des Betons ab.

Der in Abbildung 4-3 erkennbare Hystereseeffekt zwischen Adsorptionskurve und Desorptionskurve ist in der Literatur nicht abschließend geklärt. Zur Erklärung wird häufig das Tintenflaschenporenmodell [63–65] und das Modell der beidseits offenen Poren z. B. in [66; 67] herangezogen. Beide Modelle gehen davon aus, dass der Hystereseeffekt durch Energiebarrieren aufgrund von Oberflächeneffekten entsteht. Zusätzlich kann es während der Adsorption bei Bildung der Kondensatphase zu Lufteinschlüssen kommen. Das eingeschlossene Gas diffundiert nur sehr langsam aus dem porösen Medium, weshalb sich eine ausgesprochen langsame, zeitabhängige Adsorptionshysteresis ergibt. Daraus folgert Klopfer in [43], dass ein großer Anteil des Hystereseeffekts auf eine nicht ausreichende Messzeit zurückzuführen ist und sich die Kurven für  $t = \infty$  angleichen.

Die Feuchtespeicherfunktion wurde im Hinblick auf bauphysikalische Austrocknungsvorgänge von verschiedenen Autoren empirisch beschrieben [43; 62; 69]. Die mathematische Beschreibung erfolgt über die BET (Brunauer-Emmett-Teller)-Theorie [70; 71], vgl. Gleichung 4-2.

$$V = \frac{V_m \cdot c \cdot p_r}{(1 - p_r) \cdot (1 - p_r + c \cdot p_r)} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

$V_m$	Adsorbatvolumen der monomolekularen Schicht	[m <sup>3</sup> ]
$V$	Adsorbatvolumen	[m <sup>3</sup> ]
$c$	Adsorbatkonstante	[-]
$p_r$	Relativpartialdruck	[-]

### 4.2.3 Sorptionsverhalten von chloridhaltigem Beton

Die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 setzt voraus, dass chloridhaltiger Beton in den vorhandenen Umgebungsbedingungen austrocknet und sich infolge der Austrocknung unter anderem die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons verringert. Es ist bekannt, dass die hygroskopische Wirkung von z. B. Natriumchlorid als eines der häufigsten eingesetzten Taumittel ab einer relativen Feuchte von 75 % einsetzt. Dieser Punkt wird als Deliqueszenz-Luftfeuchte der Lösung bezeichnet. In der Beziehung zwischen Wassergehalt und relativer Luftfeuchte zeigt sich die hygroskopische Wirkung des Salzes und der Deliqueszenzpunkt des Salzes, materialunabhängig, durch eine sprunghafte Zunahme des Wassergehalts, wie Abbildung 4-4 nach einer Darstellung von [72] für Mauerwerk (links) und Kalksandstein (rechts) zeigt.

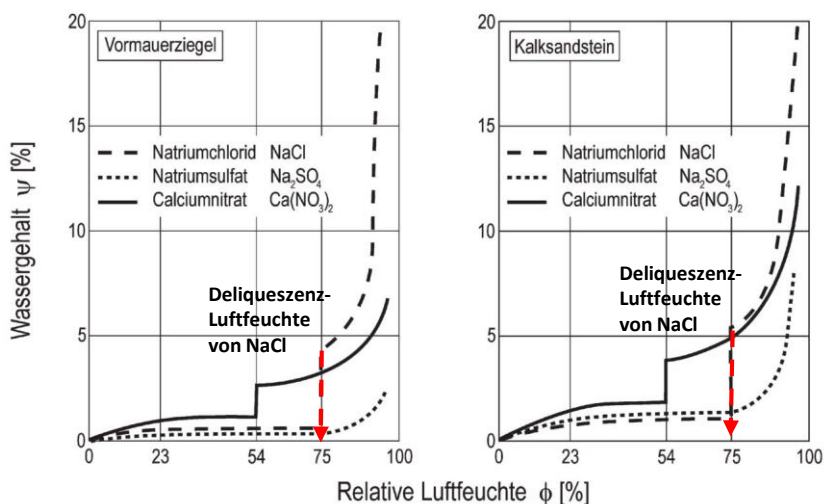


Abbildung 4-4: Einfluss von wasserlöslichen Salzen auf den Verlauf von Speicherisothermen bei porösen Baustoffen in Anlehnung an [71]

Durch die hygroskopische Wirkung des Salzes lagern sich an den äußeren Ionen des Kristallgitters Wassermoleküle an und lösen diese aufgrund der Ion-Dipol-Kräfte aus dem Gitter heraus. Die aus dem Kristallgitter gelösten Ionen führen im Porenraum zu einer Dampfdruckerniedrigung über der Lösung, was zu einem Konzentrationsgefälle mit dem Wasserdampfpartialdruck der Umgebungsluft führt. Die Dampfdruckerniedrigung ist maßgeblich von der Konzentration der gelösten Teilchen abhängig und lässt sich thermodynamisch mit dem Raoult'schen Grenzgesetz, vgl. Gleichung 4-3, für die verdünnte Lösung beschreiben [73].

$$p_i = p_{i0} \cdot x_i$$

Gleichung 4-3

- |       |   |      |
|-------|---|------|
| $p_i$ | Partialdruck der Lösung                     | [Pa] |
| $p_0$ | Partialdruck des Wassers                    | [Pa] |
| $x_i$ | Stoffmengenanteil des Wassers in der Lösung | [n]  |

Steffens zeigt in [74] für den Raoult'schen Geltungsbereich eine dreidimensionale, direkt auswertbare und stetig differenzierbare Feuchtespeicherfunktion mit starken Neigungswinkeln, vgl. Abbildung 4-5. Auch Larsen [75] beschreibt diesen stetigen Anstieg der Feuchtespeicherkurve mit zunehmendem Chloridgehalt für poröse Baustoffe wie Mauerwerk. Dabei verschiebt sich die Deliquescenz-Luftfeuchte mit abnehmendem Salzgehalt in den Bereich hoher Luftfeuchten.

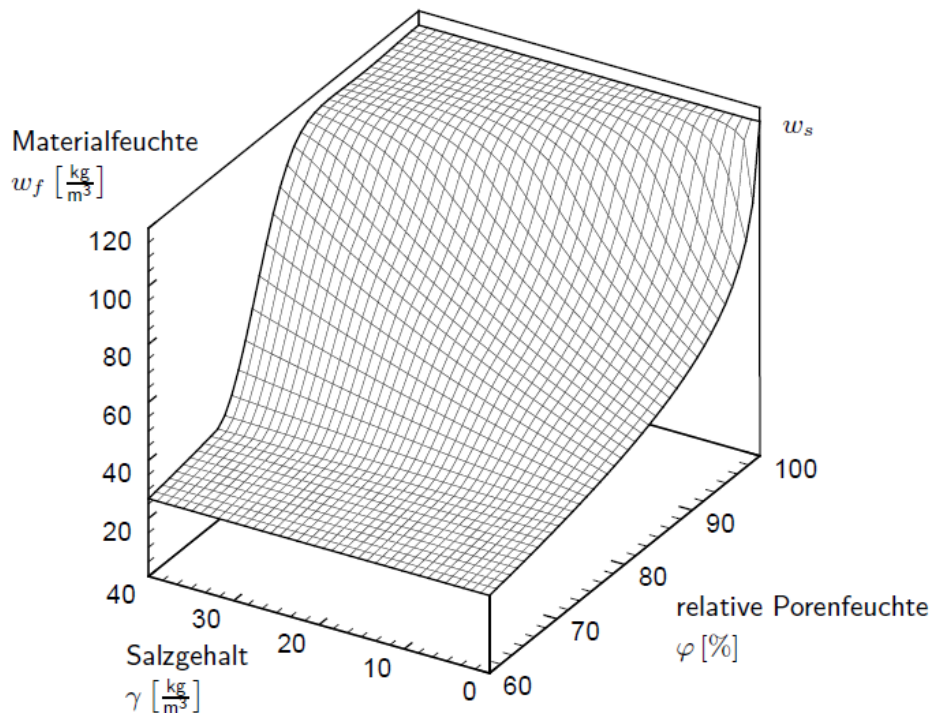


Abbildung 4-5: Feuchtespeicherfunktion für Beton in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und dem Salzgehalt [73]

Untersuchungsergebnisse von Rucker-Gramm [54] zeigen bei der Desorption von chloridhaltigen Betonen im Vergleich zu chloridfreien Betonen eine Verschiebung der Feuchtespeicherfunktion zu niedrigeren Wassergehalten. Als Ursache beschreibt die Autorin den aufgrund zusätzlich eingebrachter Ionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) geringeren Porenraum. Erst bei einer deutlichen Übersättigung der untersuchten Proben mit einem Chloridgehalt von über 35 g NaCl/100 g Wasser, dies entspricht nach Tang [76] für die untersuchten Betone einem Chloridgehalt von 10,5 M.-%/z, wird im Bereich der 75 % r. F. ein sprunghafter Wasseranstieg festgestellt.

#### 4.2.4 Einfluss der Feuchtigkeit auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton

Die Feuchtigkeit beeinflusst die Dauerhaftigkeit des Stahlbetons entscheidend auf zwei Arten. So ist mit der Wasseraufnahme in der Regel ein Transport von gelösten Ionen verbunden. Sofern Chloridionen in dem anstehenden Wasser vorhanden sind, führt dies zu einem sogenannten Huckepack-Transport [77; 78], bei dem die Ionen mit dem kapillar aufgenommenem Wasser konvektiv bis in eine gewisse Tiefe in den Beton eingetragen werden. Da ein Teil der Chloride chemisch und physikalisch von dem Zementstein gebunden wird, lässt sich ein sogenannter Chromatografie-Effekt feststellen, bei dem die Wasserfront der Chloridfront vorausseilt [77; 79].

In wassergefüllten Porensystemen findet der Ionentransport aufgrund eines Konzentrationsgefälles über Ionendiffusion statt. Dieser Diffusionsstrom kann für gesättigte Porenräume und stationäre Verhältnisse vereinfacht über das erste Fick'sche Diffusionsgesetz [76] oder instationär über das zweite Fick'sche Diffusionsgesetz beschrieben werden. Für die Lebensdauerbemessung von Stahlbeton werden in der Regel probabilistische Modelle oder semiprobabilistische Nachweiskonzepte verwendet, siehe z. B. [78; 80].

In teilwassergesättigten Betonen reduziert sich der Ionentransport durch Diffusion in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad deutlich [81–83]. Ein hierfür in der Literatur beschriebener Einflussfaktor ist die Tortuosität, mit der die Gewundenheit eines Transportweges beschrieben wird [84; 85]. So verlängert sich der mittlere Transportweg für die Ionenwanderung mit abnehmender Sättigung, wie in Abbildung 4-6 schematisch verdeutlicht wird.

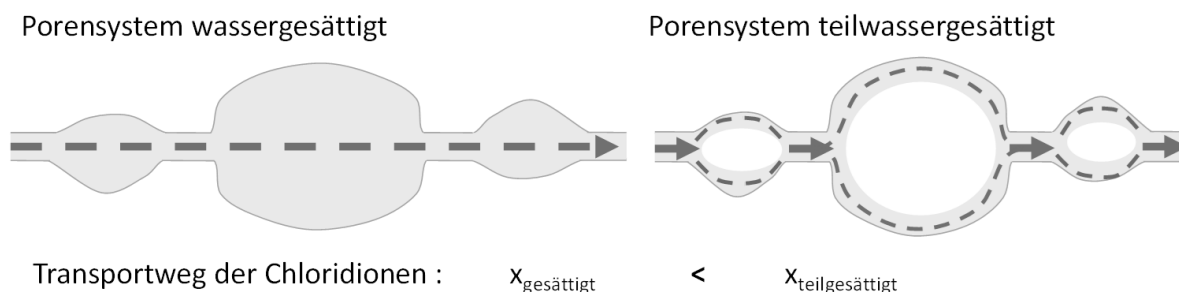


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des Transportweges durch ein gesättigtes Porensystem und durch ein teilwassergesättigtes Porensystem

Die Ionendiffusion verläuft über die an der Porenwand verbleibende Sorbatschicht und die Ionen können nicht mehr auf direktem Wege durch die Poren wandern. Zusätzlich treten die Ionen der Sorbatschicht vermehrt in eine Interaktion mit der Porenoberfläche. Hierbei kann eine Analogie zu der von Wiens [86] aufgestellten Theorie des „ionogenic pore blocking effect“ getroffen werden. So beschreibt Wiens für Betone mit reduzierten Porenquerschnitten die Ausbildung von elektrischen Doppelschichten und die daraus folgende geschwindigkeitsreduzierende Wechselwirkung zwischen Porenoberfläche und den Chloridionen. Für teilwassergesättigte Betone übertragen Celebi und Breit [87] diesen Effekt auf die

Sorbatschicht in teilwassergesättigten Poren, durch die sich die Ionen aufgrund des Konzentrationsgefälles hindurchbewegen.

Diese beschriebenen Effekte haben einen entscheidenden Einfluss auf die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons und wirken sich entsprechend auf den elektrolytischen Betonwiderstand aus.

### 4.3 Spezifischer elektrolytischer Widerstand von Beton

#### 4.3.1 Allgemeines

Beton gilt als Leiter II. Ordnung, mit der Fähigkeit Ladungsträger in der Porenlösung zu transportieren [88]. Ohne eine Porenflüssigkeit stellt Beton mit Widerständen von  $10^6 \Omega\text{m}$  weitestgehend einen Isolator dar, der keine relevante elektrolytische Leitfähigkeit besitzt.

Die Wanderung der Ionen in der Porenflüssigkeit ergibt sich aus ihrer temperaturabhängigen elektrischen Beweglichkeit und aus einem Potentialunterschied. Die Wanderungsgeschwindigkeit in diesem elektrischen Feld kann nach [89] entsprechend Gleichung 4-4 angegeben werden.

$$v = u \cdot \frac{U}{l} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

$U$	Potential	[V]
$u$	elektrische Beweglichkeit	[cm <sup>2</sup> /(V·s)]
$l$	Elektrodenabstand	[cm]
$v$	Wanderungsgeschwindigkeit	[cm/s]

Die Beschreibung des Stoffflusses in Gleichung 4-5 führt mit der Wanderungsgeschwindigkeit aus Gleichung 4-4 zur elektrischen Stromstärke, Gleichung 4-6.

$$J = c \cdot A \cdot v \quad \text{Gleichung 4-5}$$

$J$	Stofffluss	[mol/ (m <sup>2</sup> ·s)]
$c$	Konzentration	[mol]
$A$	Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]

$$I = z \cdot F \cdot c \cdot A \cdot u \cdot \frac{U}{l} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

$F$	Faraday-Konstante	[C/mol]
$z$	Ladungszahl eines Ions	[-]
$I$	Strom	[A]

Daraus folgt, dass der Strom proportional zur Spannung ist [90], vgl. Gleichung 4-7.

$$I = G \cdot U \quad \text{Gleichung 4-7}$$

$G$  Leitwert [S]

Der Leitwert wird in der Einheit Siemens angegeben. Der reziproke Wert der Leitfähigkeit ist der Ohm'sche Widerstand aus Gleichung 4-8.

$$U = R \cdot I \quad \text{Gleichung 4-8}$$

$R$  Ohm'scher Widerstand [ $\Omega$ ]

In der vorliegenden Form ist der Widerstand bzw. die Leitfähigkeit noch von der Dimension der Messzelle abhängig. Durch die Angabe des spezifischen Widerstands ( $\rho$ ) ergibt sich eine dimensionslose Größe, die im homogenen Feld einen Stoffparameter beschreibt, vgl. Gleichung 4-9.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad \text{Gleichung 4-9}$$

$\rho$  spezifischer Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ]

### 4.3.2 Einflussfaktoren auf den spezifischen Elektrolytwiderstand von Beton

Der spezifische Elektrolytwiderstand als inverse Leitfähigkeit des Betons ist von einer Reihe materialspezifischer Einflussfaktoren abhängig. Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, ist für die Leitfähigkeit des Betons als Leiter II. Ordnung die Porenlösung verantwortlich. Somit ergeben sich zwei wesentliche Merkmale, welche den spezifischen Widerstand beeinflussen:

- die Porenraumstruktur und der Füllungsgrad der Poren
- die Zusammensetzung der Betonporenlösung.

Die Porenraumstruktur des Betons verändert sich über die Hydratation des Zementsteins mit zunehmendem Alter [91; 92]. Infolge der Bildung von CSH-Phasen verdichtet sich das Betongefüge, und der Transportweg für die Ladung verlängert sich aufgrund der zunehmenden Tortuosität. Dies hat zudem Effekte auf die Beweglichkeit der Ionen sowie auf den Füllungsgrad der Poren, wie in Abschnitt 4.2 erläutert wurde. Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit abnehmender Porensättigung, z. B. infolge von Trocknung, die Leitfähigkeit des Betons signifikant abnimmt [93].



Die Zusammensetzung der Porenlösung wird maßgeblich von den verwendeten Ausgangsstoffen des Betons beeinflusst. In Abhängigkeit von der verwendeten Zementart und dem Mischungsverhältnis sind üblicherweise  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  in unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden. Im Weiteren führen zeitabhängige Faktoren während der Hydratation zu einer Änderung der Leitfähigkeit der Porenlösung. So werden etwa Sulfate bei der Ettringitbildung gebunden und die Konzentration an Natrium- und Kaliumionen nimmt zu [94]. Mit zunehmendem Alter und mit abklingender Hydratation stabilisiert sich die Zusammensetzung der Porenlösung. Zusammen mit der Verdichtung des Porengefüges führt dieser Effekt auch bei konstanter Wassersättigung zu einem Anstieg des spezifischen Elektrolytwiderstands über die Zeit, vgl. Abbildung 4-7 aus [95].

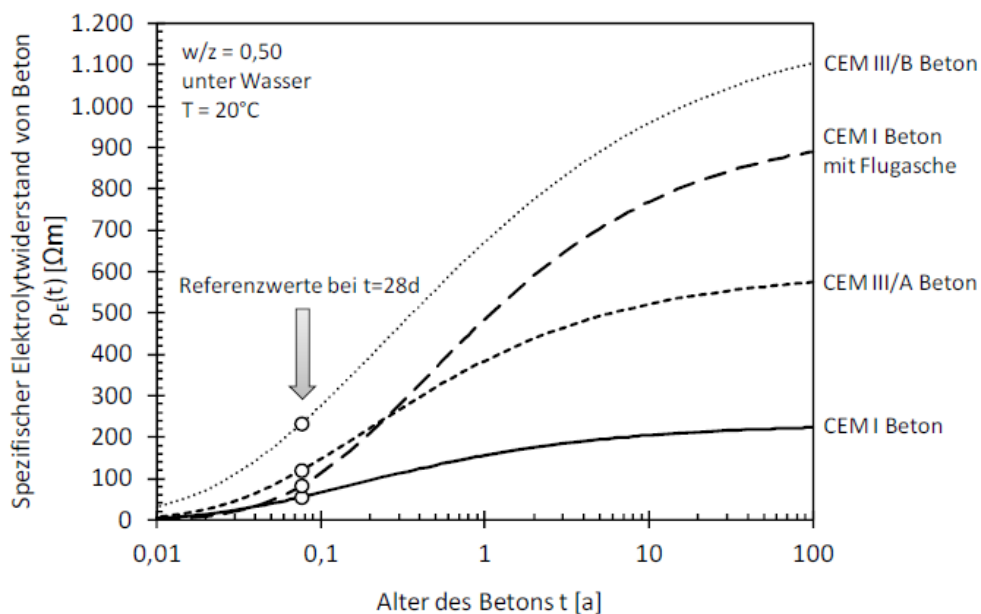


Abbildung 4-7: Zeitliche Entwicklung des spezifischen Widerstands von wassergesättigten Betonen unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung aus [94]

Aus Abbildung 4-7 lässt sich ebenfalls der Einfluss der Bindemittelart auf den spezifischen Elektrolytwiderstand des Betons erkennen. So verfügt Beton mit puzzolanischen oder latent-hydraulischen Bindemitteln über einen deutlich höheren spezifischen Widerstand als Beton mit Portlandzement als Bindemittel.

Weitere Einflussfaktoren ergeben sich aus der Umwelt. So tragen nach Büchler [96] Chloride oder auch die Carbonatisierung infolge von eindringendem  $\text{CO}_2$  zu einer Änderung der Leitfähigkeit der Porenlösung bei, die sich auf den spezifischen Elektrolytwiderstand des Betons auswirkt. Ebenso ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit, die mittels der Arrhenius-Gleichung [97] den Einfluss auf die Beweglichkeit der Ionen beschreibt.

### 4.3.3 Einfluss des spezifischen Elektrolytwiderstands auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton

Der spezifische Elektrolytwiderstand des Betons ist integraler Bestandteil des in Abschnitt 2.2 vorgestellten Arbeitsmodells und besitzt damit einen Einfluss auf die Korrosionskinetik des Korrosionssystems Stahl in Beton. Aus der Literatur [35; 98–101] ergeben sich Zusammenhänge, über die das Korrosionsrisiko in Abhängigkeit vom Elektrolytwiderstand abgeschätzt und mit der Elementstromdichte korreliert wird. Tabelle 4-1 zeigt hierbei die Bewertung der Elementstromdichten und des spezifischen Elektrolytwiderstandes im Hinblick auf die Auswirkung der Bewehrungskorrosion. Der jährliche Querschnittsverlust errechnet sich dabei über für gleichmäßige Korrosion nach Faraday. Bei lokaler Lochkorrosion entstehende Querschnittsverluste liegen in der Regel deutlich über den Querschnittsverlusten bei gleichmäßiger Korrosion. Entsprechend ist der tatsächliche Korrosionsabtrag pro Jahr maßgeblich von der Anodengröße abhängig und lässt sich nicht ohne Kenntnis der Anodenfläche ermitteln.

Tabelle 4-1: Korrosionsrisiko in Abhängigkeit vom spezifischen Elektrolytwiderstand und von der Elementstromdichte nach [35; 98–99]

Spezifischer Elektrolytwiderstand [98; 99]	Elementstromdichte [97; 99]	Jährlicher Querschnittsverlust <sup>1)</sup>	Lebensdauer <sup>2)</sup> Bewehrungsstahl d = 10 mm	Auswirkung der Korrosion [97–99]
[ $\Omega\text{m}$ ]	[ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	[mm/a]	[a]	[-]
> 1.000	$\leq 0,1$	$\leq 0,001$	> 100	vernachlässigbar
500 – 1.000	0,1 – 0,5	0,001 – 0,005	25 – 100	gering
100 – 500	0,5 – 1,0	0,005 – 0,010	10 – 25	moderat
< 100	> 1,0	> 0,010	$\leq 10$	hoch

<sup>1)</sup> Berechnet nach Faraday für gleichmäßige Korrosion

<sup>2)</sup> Querschnittsverlust  $\leq 1\%$  als Begrenzung der Lebensdauer eines Bewehrungsstahls mit d = 10 mm

Die in Tabelle 4-1 beschriebene Auswirkung der Korrosion auf die Lebensdauer wird auf den Querschnittsverlust/ Jahr bezogen und entspricht einer empirischen Festlegung aus [35]. Korrosionsstromdichten  $\leq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  implizieren mit einem jährlichen Querschnittsverlust von  $\leq 0,001 \text{ mm/a}$  für einen Bewehrungsdurchmesser von 10 mm eine Lebensdauer > 100 Jahre (der Querschnittsverlust soll über die Lebensdauer nicht  $\leq 1\%$  betragen) und können somit als vernachlässigbar gelten.

Zur Abschätzung der Korrosionsgeschwindigkeit  $i_{\text{korr}}$ , unter Vernachlässigung der Anodenfläche, wurde im Rahmen des europäischen DuraCrete-Projekts [102] ein empirisches Modell in Anlehnung an [103] entwickelt. Dieses wurde von Osterminski [94] im Rahmen der Quantifizierung von Parametern für die vollprobabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton weiterentwickelt. Vereinfacht dargestellt ergibt sich die Korrosionsgeschwindigkeit aus einem

Regressionsparameter und dem spezifischen Elektrolytwiderstand des Betons, vgl. Gleichung 4-10.

$$I_{\text{korr}} = \frac{k_0}{p_{(t)}} \quad \text{Gleichung 4-10}$$

$k_0$	Regressionsparameter z. B. aus [94]	[-]
$p_{(t)}$	zeitabhängiger spezifischer Elektrolytwiderstand des Betons	[-]

Der zeitabhängige spezifische Elektrolytwiderstand des Betons ergibt sich nach Osterminski [94] gemäß Gleichung 4-11

$$p_{E(t)} = p_{E,(0)} \cdot f_{h(t)} \cdot f_t \cdot f_{Cl} \cdot f_T \cdot f_{E,m} \quad \text{Gleichung 4-11}$$

$p_{E(0)}$	Referenzwert des spezifischen Elektrolytwiderstands des Betons	[ $\Omega\text{m}$ ]
$f_{h(t)}$	Faktor zur Berücksichtigung der Bindemittelhydratation	[-]
$f_t$	Faktor zum Einfluss der Testmethode	[-]
$f_{Cl}$	Faktor zur Berücksichtigung des Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung	[-]
$f_T$	Faktor für den Temperatureinfluss	[-]
$f_{E,m}$	Faktor zur Berücksichtigung der Feuchtigkeit	[-]

In seiner abschließenden Bewertung schreibt Osterminski [94] dem spezifischen Widerstand gerade im Bereich hoher spezifischer Widerstände eine maßgebliche Kontrollfunktion zu. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch Warkus [104; 105] durch die numerische Simulation der geometrieabhängigen Kontrollmechanismen der Teilwiderstände, vgl. Abbildung 4-8.

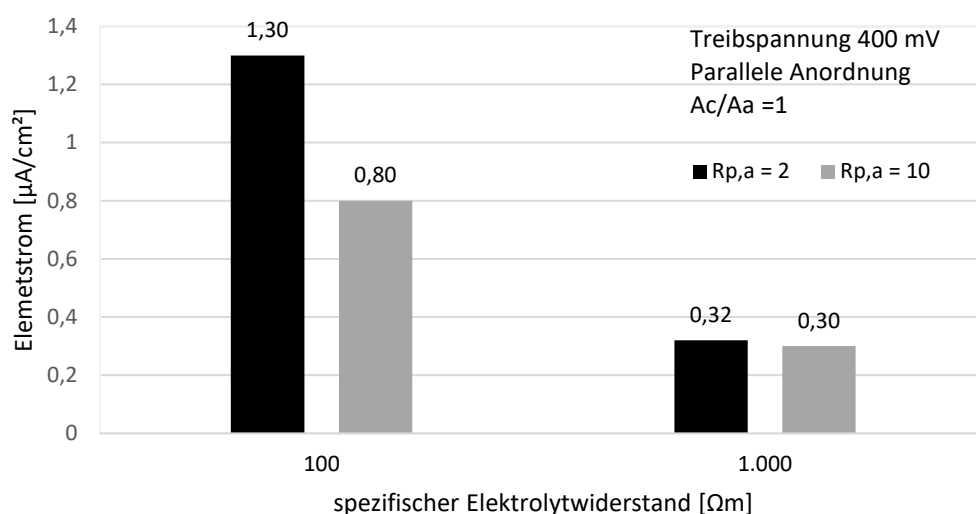


Abbildung 4-8: Einfluss von Polarisationswiderständen und spezifischen Elektrolytwiderständen auf die Elementstromdichte bei einer Treibspannung von 400 mV und einer parallelen Anoden-/Kathodenanordnung im Verhältnis 1:1 [105]

Warkus postuliert in seiner Arbeit [105], dass im Bereich niedriger elektrolytischer Widerstände bis 500  $\Omega\text{m}$  die anodische Kontrolle über den Polarisationswiderstand maßgeblichen Einfluss auf den Elementstrom besitzt. So führt eine Erhöhung des spezifischen anodischen Polarisationswiderstands von 2  $\Omega/\text{m}^2$  auf 10  $\Omega/\text{m}^2$  bei einer Treibspannung von 400 mV und einem spezifischen Elektrolytwiderstand von 100  $\Omega\text{m}$  zu einer Reduktion der Elementstromdichte von 40 %. Bei einem spezifischen Elektrolytwiderstand von 1.000  $\Omega\text{m}$  reduziert sich die Elementstromdichte bei gleicher Erhöhung des Polarisationswiderstands lediglich um 6 %. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Austrocknung und einer damit einhergehenden Erhöhung des spezifischen Elektrolytwiderstands eine allmähliche Widerstandskontrolle des Betons eintritt und der Ionentransport durch den Elektrolyten soweit verlangsamt wird, dass es auch zu einer deutlichen Reduzierung der Korrosionskinetik kommt.

Auch Brem zeigt in [36] durch die Berechnung von Teilwiderständen den Einfluss des spezifischen Elektrolytwiderstands auf die Steuerung der Korrosion. Er definiert hierbei die Kontrollanteile zur Steuerung der Korrosion über den Anteil des Teilwiderstands am Gesamtwiderstand. Ab einem Anteil von > 60 % werden die Teilwiderstände für die Steuerung maßgeblich. Übernimmt man die Brem'sche Korrelation und fügt dabei auch die Regression von Andrade [100] und die Bewertung aus Tabelle 4-1 ein, ergibt sich das in Abbildung 4-9 dargestellte doppellogarithmische Schaubild zur Korrosionsstromdichte in Abhängigkeit vom spezifischen Elektrolytwiderstand.

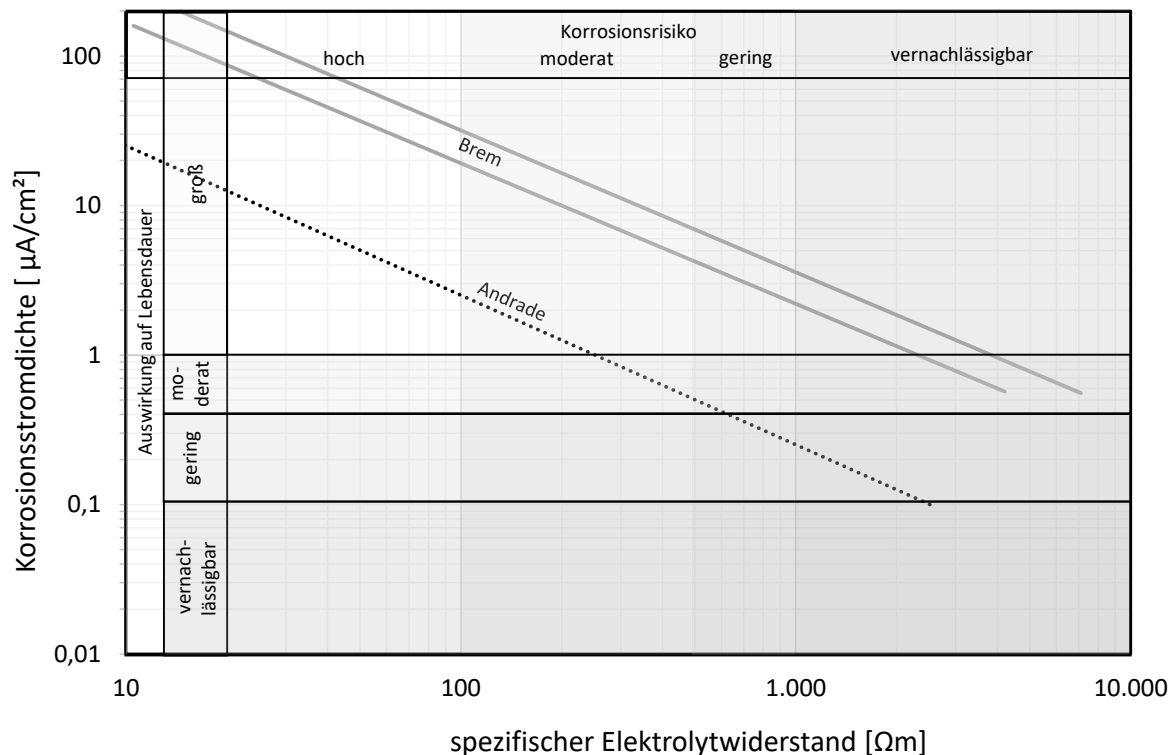


Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen gemessener Korrosionsstromdichte und spezifischem Widerstand mit Darstellung der Regression nach Brem [36] und Andrade [100]

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der drei vorgenannten Autoren kommen u. a. Hornbostel und Angst in [106] auf Grundlage eigener Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass der Einfluss des spezifischen Elektrolytwiderstands auf das Korrosionssystem in der Literatur überschätzt wird. Der entscheidende geschwindigkeitsbegrenzende Faktor sei die anodische Widerstandskontrolle [106; 107].

## 4.4 Korrosion von Stahl in Beton

### 4.4.1 Allgemeines

Unter Korrosion wird gemeinhin die messbare elektrochemische, chemische oder physikalische Veränderung eines Stoffes in Reaktion mit seiner Umgebung verstanden. Sie zeigt sich in Korrosionserscheinungen, z. B. Loch- oder Flächenkorrosion, und den entstehenden Korrosionsprodukten. Ein Korrosionsschaden entsteht im Grunde erst dann, wenn die Korrosionserscheinung die Eigenschaften des Stoffes soweit verändert, dass sich daraus die Lebensdauer reduziert oder eine sonstige Beeinträchtigung des Stoffes oder auch seiner Umgebung entsteht.

DIN EN ISO 8044 [108] unterscheidet eine Vielzahl von Korrosionsarten, die nach [109] und [110] grundlegend in folgende zwei Korrosionsgrundarten eingeteilt werden können:

- chemische Korrosion
- elektrochemische Korrosion.

Der Fokus der Arbeit richtet sich auf die elektrochemische Korrosion, bei der es unter dem Vorhandensein eines Elektrolyten zu einer anodischen und kathodischen Teilreaktion kommt.

#### 4.4.2 Einleitungsphase

Während ein unlegierter Stahl an der Atmosphäre korrosionsbereit vorliegt, wird die Bewehrung des Stahlbetons durch den hohen pH-Wert zwischen 12,0 und 13,8 der Betonporenlösung und der damit verbundenen Ausbildung der sogenannten Passivschicht vor Korrosion geschützt [14; 111–113]. Die Passivschicht besteht nach [19; 114–116] aus einer lediglich Nanometer dicken, dichten Doppelschicht aus  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Der Stahl verhält sich im alkalischen Beton vergleichbar mit nichtrostenden Stählen an der Atmosphäre. Dies bedeutet, dass sich der Stahl trotz der Potentialdifferenz zwischen Sauerstoff- und Metallelektrode nicht auflöst [109; 117].

Bewehrungskorrosion tritt in der Regel erst dann ein, wenn sich diese Doppelschicht flächig oder partiell auflöst. Ein Grund für den Verlust der Schutzwirkung kann unter praktischen Bedingungen durch die Carbonatisierung (flächige Auflösung der Passivschicht durch den Verlust der Alkalität) oder durch das Eindringen korrosionsfördernder Stoffe wie Chloridionen (partielle Auflösung der Passivschicht) auf Höhe der Bewehrung erfolgen. Entsprechend lässt sich gemäß [1] und [77] folgender schematischer Schadensverlauf darstellen.

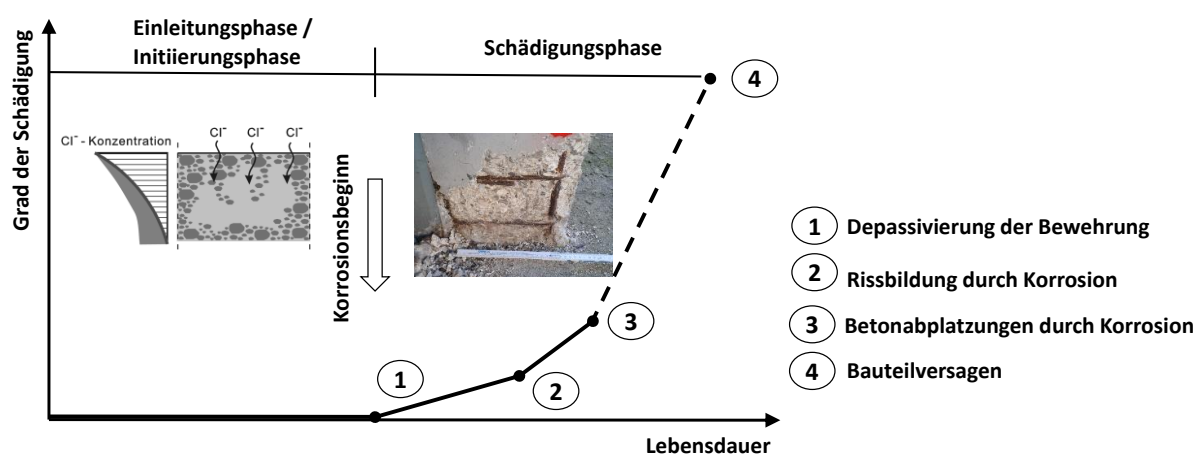


Abbildung 4-10: Schematischer Schadensverlauf eines Stahlbetonbauteils infolge Korrosion nach [1] und [77]

Sowohl der Eintrag des CO<sub>2</sub> als auch der Transport der Chloridionen wird über Diffusionsmechanismen in Analogie zum Feuchtetransport beschrieben. Vereinfacht folgt der Carbonatisierungsfortschritt dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz [118], während ein Chlorideintrag über das zweite Fick'sche Diffusionsgesetz beschrieben werden kann [119; 120], vgl. Gleichung 4-12.

$$C(x, t) = C_s \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff,C}} \cdot t}} \right] \quad \text{Gleichung 4-12}$$

$C(x,t)$	Chloridgehalt des Betons in der Tiefe x zum Zeitpunkt t	[M.-%/z]
$D_{\text{Eff,C}}$	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]
$C_s$	Chloridgehalt an der Betonoberfläche zum Beobachtungszeitpunkt t	[M.-%/z]
$x$	Tiefe im Beton, mit einem korrespondierenden Chloridgehalt C(x,t)	[m]
$\operatorname{erf}$	Fehlerfunktion	[-]

#### 4.4.3 Initiierung der Korrosion

Die chloridinduzierte Korrosion des Bewehrungsstahls im Stahlbeton erfolgt erst mit dem Überschreiten eines kritischen Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung [19] verbunden mit einer lokalen Depassivierung. In der Literatur schwankt die Angabe zu einem mittleren kritischen Chloridgehalt zwischen 0,44 M.-%/z [19] bei starker Polarisation und 1,20 M.-%/z [121] bei geringer Polarisation. Aus den Regelwerken lässt sich für Stahlbeton ein unterer Grenzwert von 0,4 M.-%/z [18] oder ein Wert von 0,5 M.-%/z nach TR-IH [9] ableiten. Grundsätzlich ist es aufgrund der Variation der Randbedingungen und der Vielzahl von Parametern fraglich, ob es einen allgemeingültigen Grenzwert auf Basis eines Chloridgehalts für die chloridinduzierte Korrosion tatsächlich gibt. Breit, Dauberschmidt et al führen in [122] Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und Praxisuntersuchungen zusammen und bestätigen als unteren Grenzwert für chloridinduzierte Bewehrungskorrosion einen Wert von 0,5 M.-%/z für Bewehrungsstäbe mit einer Betondeckung > 15 mm in einem dichten alkalischen Betongefüge ohne äußere Polarisierung.

#### 4.4.4 Korrosionsphase

Bei Vorhandensein einer homogenen Passivschicht existieren nach Strehblow [112] drei mögliche Startvorgänge, die zu einer ersten kleinen Stelle aktiver Metallauflösung innerhalb der passiven Oberfläche führen: Penetrations-Mechanismus, Schichtriss-Mechanismus und Adsorptions-Mechanismus, vgl. Abbildung 4-11.

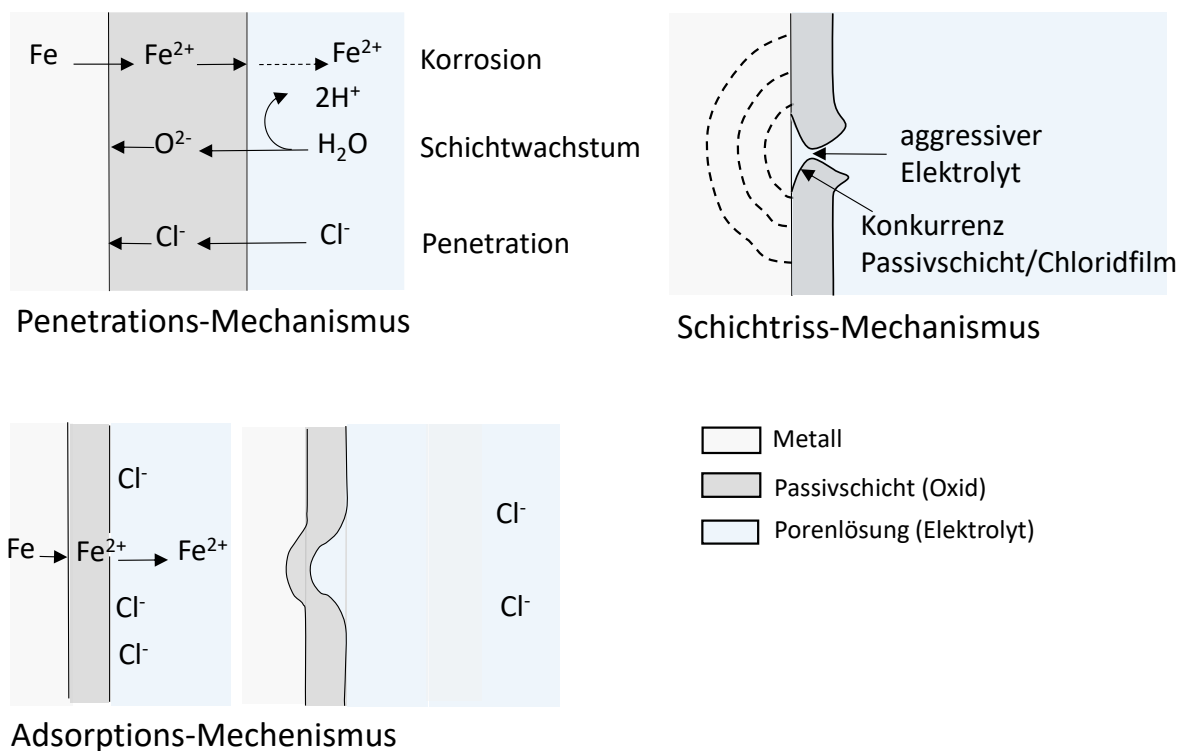
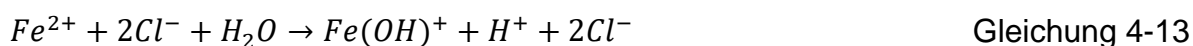


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der möglichen Startvorgänge der Lochkorrosion nach [112]

Die Erkenntnisse von Strehblow ergeben sich aus Korrosionsuntersuchungen von Stahl in einer elektrolytischen Lösung. Im Korrosionssystem Stahlbeton stellt die Grenzschicht zwischen Stahl und Beton, das sogenannte SCI (steel-concrete interface), im Vergleich zu anderen Korrosionssystemen in wässriger Lösung eine Besonderheit dar, welche sich zum Teil deutlich in der Korrosionskinetik unterscheidet [123]. Durch die sehr große Inhomogenität des SCI kann die erste Korrosionsinitiierung deutlich beeinflusst werden. Zu den bekannten Einflüssen wie Chloridgehalt, pH-Wert, Bewehrungslage und Betongefüge ist eine Vielzahl an Einflussparametern wie die Feuchtigkeitsbedingungen in Hohlräumen im Bereich der Grenzfläche oder auch der Einfluss von Bewehrungsschnittpunkten noch nicht ausreichend untersucht [124]. Obwohl die exakten Mechanismen der Lochkorrosionsinitiierung im Stahlbeton noch nicht abschließend geklärt sind, folgern Angst et al., dass sich die grundlegenden Prinzipien im Stahlbeton mit den Erkenntnissen aus den Lösungsversuchen decken [125].

Nach der Initiierung des Startvorgangs kann es im anodisch wirkenden Bereich des Bewehrungsstahls durch Hydrolyse des Kations zur Ansäuerung des anodennahen Elektrolyten kommen, vgl. Gleichung 4-13.





Bei fortschreitender Ansäuerung ( $pH \leq 5$ ), kann auf den anodisch wirkenden Oberflächen, ein weiterer kathodischer Teilprozess nach Gleichung 4-14 stattfinden:



Die Chloridionen wirken dabei als Katalysator und verhindern die Repassivierung des Bewehrungsstahls. Die Potentialdifferenz zwischen lokaler Anode und umgebenden Kathoden bewirkt bei diesem Prozess zusätzlich eine Migration von Chloridionen in den Teil des Elektrolyten, der bei einer Elektrolyse im direkten Einfluss der Anode steht, sofern dichte Korrosionsprodukte diesen Transportmechanismus nicht unterbinden. Der Korrosionsvorgang, welcher auf diesen zusätzlichen kathodischen Teilschritt zurückzuführen ist, wird als Eigenkorrosion [14; 126] oder auch Micro-cell corrosion [127] bezeichnet und lässt sich nur unzureichend messtechnisch erfassen.

#### 4.4.5 Korrosionsabtrag

Für eine lebensdauerbegrenzende Korrosion müssen nach Gehlen [77] folgende Grundvoraussetzungen im Stahlbeton gleichzeitig erfüllt sein:

- Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode
- elektrolytisch leitendes Milieu zwischen Anode und Kathode
- elektrischer Kontakt zwischen Anode und Kathode
- anodische Eisenauflösung
- ausreichende Menge an Sauerstoff im Elektrolyten.

Sind alle diese Voraussetzungen erfüllt, lassen sich die Zusammenhänge im Korrosionssystem mit Gleichung 2-1 sowie mit dem in Abbildung 2-1 dargestellten Ersatzschaltbild beschreiben. Aus dem in Gleichung 2-1 dargestellten Korrosionsstrom  $I_{\text{korrr}}$  kann über das Faraday'sche Gesetz auf einen Korrosionsabtrag geschlossen werden. Gleichung 4-15 zeigt die Proportionalität zwischen der geflossenen Ladung und dem Massenumsatz der jeweiligen Reaktion.

$$\Delta m = \frac{M}{z \cdot F} \cdot \int I_{\text{korrr}}(t) \cdot dt \qquad \text{Gleichung 4-15}$$

$\Delta m$	Masseverlust	[kg]
$M$	molare Masse	[kg/mol]
$z$	Elektrodenvalenz	[-]
$F$	Faradaykonstante	[C/mol]

Nach Stern und Geary [128] kann der Korrosionsstrom  $I_{\text{korr}}$  vereinfacht über die Stern-Geary-Gleichung über den Polarisationswiderstand und eine Proportionalitätskonstante B ermittelt werden, vgl. Gleichung 4-16.

$$I_{\text{korr}} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{\beta_A |\beta_C|}{2.3 (\beta_A + |\beta_C|)} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Gleichung 4-16}$$

$\beta_A$	Tafelkoeffizient Anode	[-]
$\beta_C$	Tafelkoeffizient Kathode	[-]
$R_p$	Polarisationswiderstand	[ $\Omega$ ]
$B$	Proportionalitätskonstante	[V]

Messtechnisch kann der Polarisationswiderstand in einer Drei-Elektrodenanordnung entsprechend Gleichung 4-17 ermittelt werden.

$$R_p = \left( \frac{\Delta E}{i} \right) \quad \text{Gleichung 4-17}$$

$\Delta E$	Polarisierung um das freie Korrosionspotential	[mV]
$i$	angelegte Stromdichte	[mA/m <sup>2</sup> ]

## 5 Versuchskonzeption und Untersuchungsmethoden

### 5.1 Allgemeines

Zur Bearbeitung und Beantwortung der in Abschnitt 2.1 aufgeführten Fragestellungen wurde ein Versuchsprogramm mit einer Reihe elektrochemischer und gravimetrischer Untersuchungen entwickelt. Ein maßgeblicher Teil der Versuche ist dabei dem DFG-Forschungsvorhaben BR 4026/3-1 und DA 1325/2-1 zuzuordnen. Neben den DFG-Versuchsreihen „W-Cl-Single“ und „W-Cl-Multi“ wurde zur Anwendung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) eine weitere Untersuchungsreihe „W-Cl-Plus“ aufgesetzt, um offene Fragestellungen aus den DFG-Untersuchungen zu beantworten. Im folgenden Abschnitt werden die Prüfserien, die entwickelten Probekörper sowie die durchgeführten Untersuchungen mit den jeweiligen Messgrundlagen vorgestellt.

### 5.2 Versuchsreihe und Ziele

Um die Austrocknung chloridbelasteter Betone sowie die Auswirkungen der Austrocknung auf die Korrosionsparameter zu untersuchen, wurden drei Versuchsreihen entwickelt. Tabelle 5-1 zeigt die Versuchsreihen, die Versuchsmethoden und die damit verknüpften Einflussparameter.

Tabelle 5-1: Versuchsreihen und untersuchte Einflussparameter

Versuchsreihe	Untersuchungsmethoden	variierende Größen	untersuchte Einflussparameter
W-CL-Single	Gravimetrische Bestimmung des Wassergehalts $w$ Zwei-Elektrodenmessung zur Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands $\rho$	Zementart w/z-Wert Chloridgehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sorptionsisotherme des chloridhaltigen Betons</li> <li>▪ spezifischer Elektrolytwiderstände bei Ausgleichsfeuchte</li> </ul>
W-Cl-Multi	Zwei-Elektrodenmessung zur Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands $\rho$ freies Korrosionspotential $E_0$ Makrozellkorrosionsstrom $i_{\text{Korr}}$ linearer Polarisationswiderstand $LR_P$	Zementart w/z-Wert Beschichtungsart Chloridgehalt Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Austrocknung von unbeschichtetem und beschichtetem Beton über den Untersuchungszeitraum in trockenem Laborklima.</li> <li>▪ Einfluss der Austrocknung auf die Korrosionsparameter unbeschichteter und beschichteter Probekörper</li> </ul>
W-Cl-Plus	freies Korrosionspotential $E_0$ Makrozellkorrosionsstrom $i_{\text{Korr}}$ linearer Polarisationswiderstand $LR_P$ Durchtrittswiderstand $R_{\text{ct}}$	Chloridgehalt Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfluss der Austrocknung auf spezifische kinetische Daten von Elektrodenprozessen</li> </ul>

### 5.3 Probekörper zu den Versuchsreihen

#### 5.3.1 Entwicklung und Geometrie der Probekörper

Die Ermittlung der Sorptionsisotherme und des sich dabei einstellenden spezifischen Elektrolytwiderstands erfolgte an Flachprismen mit den Abmessungen 150 mm x 100 mm x 25 mm mit der Versuchsserienbezeichnung „W-CI-Single“, vgl. Abbildung 5-1. Die Prüfkörper wurden in Kunststoffschalungen hergestellt und nach dem Ausschalen für sieben Tage im Wasser und anschließend bei einer relativen Feuchte von 98 % gelagert, die weiteren Lagerungsbedingungen ergeben sich aus der Versuchsbeschreibung. Die Elektrolytwiderstände der Probekörper wurden mit Hilfe von an den Stirnseiten einbetonierten Titanmischoxid-Bändern bestimmt.

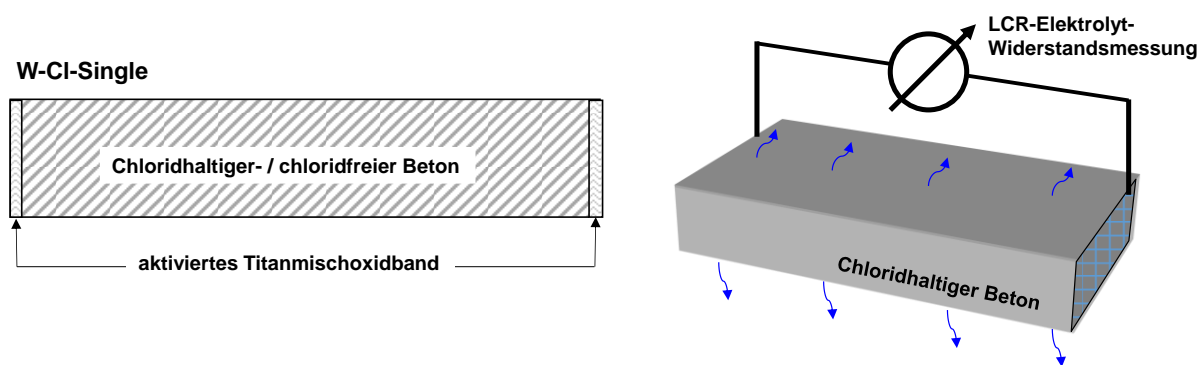


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung Probekörper „W-CI-Single“

Die Versuche zur Korrosionsaktivität des Stahls und zum Austrocknungsverhalten des Betons nach Applikation von Oberflächenschutzsystemen wurden an Multifunktionsprobekörpern mit der Versuchsserienbezeichnung „W-CI-Multi“ durchgeführt, vgl. Abbildung 5-3. Die Erfassung der Elektrolytwiderstände erfolgte dabei über eine tiefengestaffelte Anordnung von fünf Edelstahl-Elektroden – in Anlehnung an die Elektrodenleiter von Schießl und Raupach [129; 130]. Die Tiefschritte der Elektroden wurden auf 2 mm festgelegt. Die Konstruktion der Elektrodenleiter als Einbauteil erlaubt eine präzise Anordnung der Elektroden und damit eine gute Vergleichbarkeit der Messergebnisse untereinander. Zur Umsetzung des geplanten Versuchsprogramms wurden 200 Elektroden-Leitern hergestellt, welche vor der Betonage der Probekörper in den Schalungselementen fixiert wurden, vgl. Abbildung 5-2.

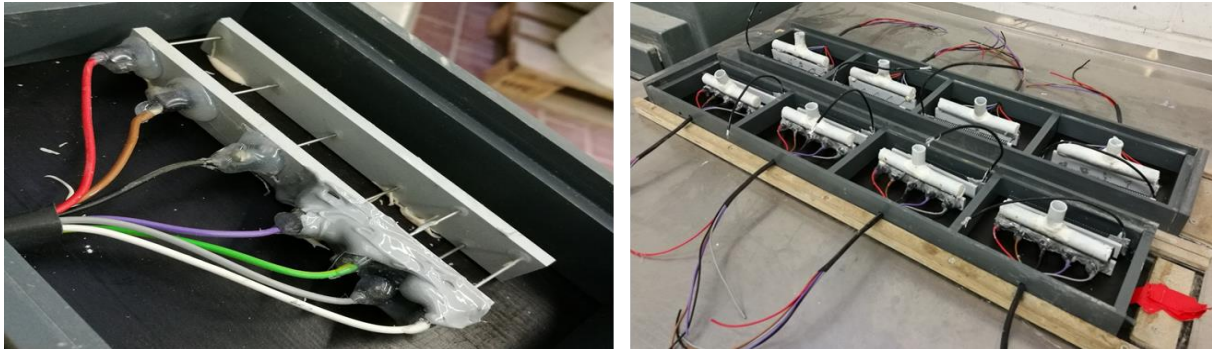


Abbildung 5-2: Anodenleiter für den chloridhaltigen Beton mit den Edelstahlanoden sowie den Stahlanoden (links); Anordnung der Elektrodenleiter in der Schalungsbatterie für chloridfreien Beton mit der Quasireferenzelektrode (QRE) und dem Zugang für die Ankopplung einer Referenzelektrode (rechts)

Die Korrosionsaktivität wurde je Probekörper an zwei Stahlanoden ( $A = 0,6 \text{ cm}^2$ ) bestimmt. Da bei sehr trockenem Beton die Gefahr einer Austrocknung von Referenzelektroden auf Mangandioxid-Basis besteht, wurde als Quasireferenzelektrode (QRE) ein Titanmischoxidband eingebaut, welches über die Zeit immer wieder gegen eine extern angekoppelte Ag/AgCl-Referenzelektrode (SSE) mit einem Potential von 205 mV gegen die Standardwasserstoffelektrode kalibriert wurde. Der Aufbau eines Multifunktionsprobekörpers „W-CI-Multi“ ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

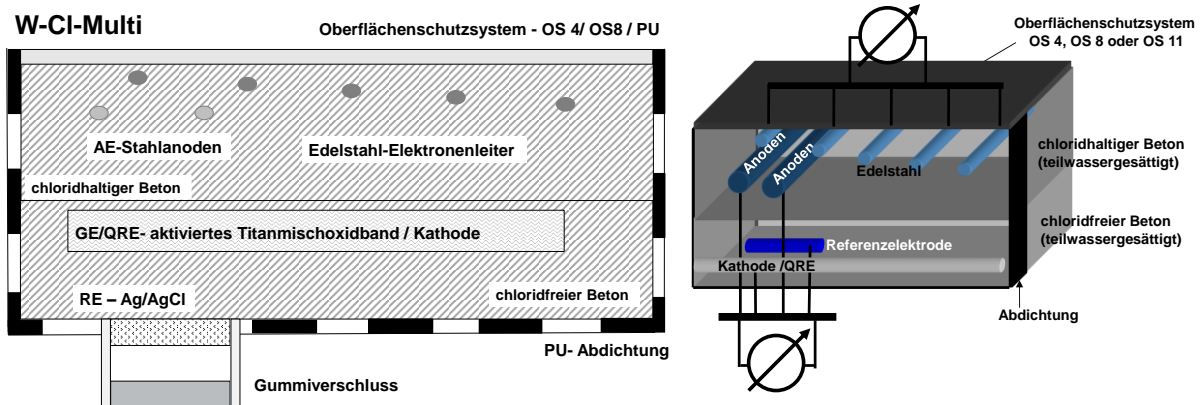


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Elektrodenanordnung im Multifunktionsprüfkörper „W-CI-Multi“ und Umsetzung im Labor

Mit den Erkenntnissen der beiden Versuchsserienreihen Single und Multi wurden für die Untersuchung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) weitere Probekörper konzipiert. Hierbei wurden ebenfalls wieder aktivierte Titanmischoxidbänder als Gegenelektrode und Quasireferenzelektroden eingebaut. Als Anode kam ein Bewehrungsstahl mit 10 mm Durchmesser zum Einsatz. Der Bewehrungsstahl wurde vor dem Einbau abschnittsweise beschichtet, so dass sich eine

Anodenflächen von 1 cm<sup>2</sup> ergibt. Der schematische Aufbau der Probekörper ergibt sich aus Abbildung 5-4.

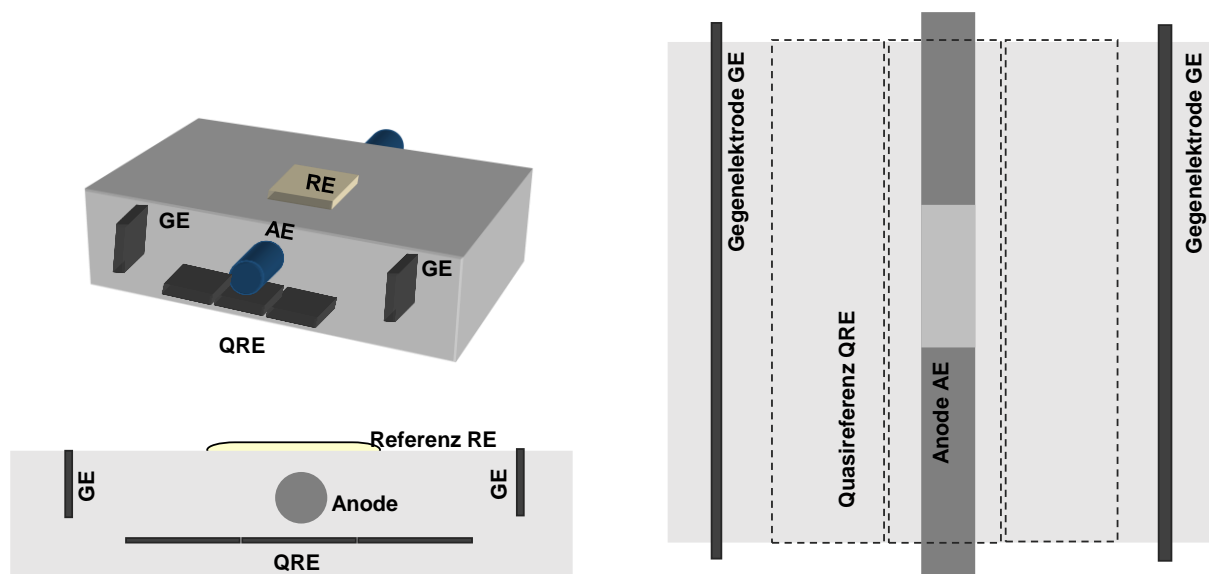


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der „W-Cl-Plus“-Probekörper

### 5.3.2 Eingesetzte Materialien

Für die Untersuchungen wurden die in Tabelle 5-2 angegebenen Betonzusammensetzungen gewählt. Die Wahl der Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung erfolgte nach DIN EN 206 [18] und DIN 1045-2 [131]. Der Wasserzementwert und die Chloridgehalte wurden auf der Grundlage der Erfahrungen bereits durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen gewählt. Damit sollte die Bandbreite der Betonqualitäten von Bestandsbauten in der Praxis abgebildet werden.

Tabelle 5-2: Untersuchte Betonzusammensetzungen

Zementart	Zementgehalt	w/z-Wert	Chlorid*		
[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[M.-%/z]		
CEM I 42,5 N	300	0,50	0	1	2
CEM I 42,5 N	300	0,60	0	1	2
CEM III/A 42,5 N	300	0,50	0	1	2
CEM III/A 42,5 N	300	0,60	0	1	2

\* in das Zugabewasser des Betons eingemischt

An den in dieser Arbeit untersuchten Betonzusammensetzungen wurden die Druckfestigkeit, die Rohdichte, der Chloridmigrationskoeffizient, der maximale Wassergehalt mit dem entsprechenden spezifischen Elektrolytwiderstand sowie die

Porosität nach DIN ISO 15901-1 [132] bestimmt. In Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse der Betonuntersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Betonuntersuchungen

Beton	Druckfestigkeit	Rohdichte	Migrationskoeffizient	Porosität	max. Wassergehalt	spez. Elektrolytwiderstand
[-]	nach 28 d	nach 28 d	nach 28 d	[Vol.-%]	[M.-%]	nach 28 d
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	x 10 <sup>-12</sup> [m <sup>2</sup> /s]			[Ωm]
CEM I, w/z = 0,5	48,6	2,390	18,8	12,0	5,0	78
CEM I, w/z = 0,6	43,1	2,345	25,6	n.b.*	5,2	55
CEM III/A, w/z = 0,5	51,6	2,410	6,9	11,4	4,8	172
CEM III/A, w/z = 0,6	46,3	2,385	8,9	n.b.*	5,3	157

\*n.b.: nicht bestimmt

Die Ergebnisse der Untersuchungen decken sich gut mit Ergebnissen, die für vergleichbare Betone in der Literatur z. B. [133] veröffentlicht wurden. Bei den eingebauten Stahlanoden der Versuchsreihe „W-CI-Multi“ handelt es sich um einen kaltverformten Stahldraht mit einem Nenndurchmesser von 1,0 mm und einer Zugfestigkeit von rd. 900 N/mm<sup>2</sup>. Vor dem Einbau wurde der Stahldraht mit Aceton gereinigt. Die chemische Zusammensetzung des Stahls wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Der Eisenanteil der Stahlanoden liegt bei 99,93 %. Weitere Legierungselemente sind vernachlässigbar. Für die Versuchsreihe „W-CI-Plus“ wurde als Anode ein Betonstahl B 500 B eingesetzt.

Im Rahmen der Arbeit wurden Beschichtungssysteme ausgewählt, die ein breites Spektrum bezüglich der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke aufweisen, vgl. Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Materialparameter der Beschichtung laut Herstellerangabe

System	Schichtdicke	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s <sub>D</sub> H <sub>2</sub> O
[-]	[μm]	[m]
OS 4	80	0,8
OS 8	2500	80
PU <sup>1)</sup>	4000	180 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> als Dichtungsschicht einer OS 11 oder OS 10

<sup>2)</sup> Kennwert aus der Literatur abgeschätzt

Die Beschichtung der Probekörper erfolgte nach Herstellerangaben. Lediglich die Eigenfeuchte der Probekörper lag zum Zeitpunkt des Beschichtens versuchstechnisch bedingt im Bereich von 5,0 M.-% und damit deutlich höher als praxisüblich. Während des Beschichtungsvorgangs und auch über die Dauer der Versuchsdurchführung konnten keine negativen Effekte wie Blasenbildung an den Beschichtungssystemen festgestellt werden.

#### 5.4 Versuche zur Bestimmung der Sorptionsisotherme von chloridhaltigem Beton

Bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme wurde die Gleichgewichtsfeuchte an den „W-Cl-Single“-Proben bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und einer konstanten Temperatur von 23 °C ermittelt.

Für die Bestimmung des Feuchtezustands wird in dieser Arbeit zwischen Adsorptions- und Desorptionsuntersuchungen unterschieden. Hierbei gilt:

- Adsorption beschreibt den Vorgang, bei dem die Wassermoleküle sich an den Festkörper (Beton) anlagern (Befeuchtung), also hier die Messreihen bei ansteigender Luftfeuchteänderung, von trocken zu feucht
- Desorption beschreibt den Vorgang, bei dem Wassermoleküle den Festkörper (Beton) verlassen (Trocknung), eine Messreihe bei fallender Luftfeuchte, von feucht zu trocken

Die Messungen der Sorptionsisotherme wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 12571 [134] durchgeführt. Hierfür wurden die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Probekörper „W-Cl-Single“ bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte in einem konstanten Klima gelagert. Um den Einfluss der Zementhydratation und daraus entstehende Effekte für die Wasseraufnahme zu reduzieren, erfolgte die Untersuchung des Betons erst nach einer Feuchtelagerung (98 % r. F.) von 91 Tagen.

Die Lagerung der Proben erfolgte in Klimaschränken und in luftdicht abgeschlossenen Klimaboxen mit gesättigten Lösungen im Gleichgewichtszustand bei einer Temperatur von 23 °C, vgl. Tabelle 5-5.

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der Betonausgleichsfeuchten in einem für Tiefgaragen praxisrelevanten Luftfeuchtespektrum. Hieraus ergab sich ein Spektrum der relativen Luftfeuchte von 55 % bis 95 %. Diese eingrenzenden Luftfeuchtegehalte wurden als Startpunkt der Adsorption (55 % r. F.) oder der Desorption (95 % r. F.) gewählt.

Tabelle 5-5: Luftfeuchten zur Ermittlung der Gleichgewichtsfeuchte bei Sorption und Desorption

Nr.	Verwendung	Relative Feuchte
[-]	[-]	[%]
1	Klimaschrank	55
2	Klimaschrank	65
3	Klimabox: NaCl / Klimaschrank	75



Nr.	Verwendung	Relative Feuchte
[-]	[-]	[%]
4	Klimabox: KCl / Klimaschrank	85
5	Klimaschrank	95

Zur Bestimmung der Masse wurden die Proben periodisch aus dem Klima entnommen und innerhalb einer Zeitspanne von rd. 120 s auf 0,1 g genau gemessen. Die Gleichgewichtsfeuchte wurde als konstant angenommen, sobald die Massenänderung innerhalb von 48 h niedriger als 0,1 % der Gesamtmasse lag.

Der gravimetrische Wassergehalt der Proben in Prozent wurde entsprechend der Gleichung 5-1 berechnet.

$$w_{x\%} = \frac{m_{x\%} - m_0}{m_0} * 100 \quad \text{Gleichung 5-1}$$

- $m_{x\%}$  Masse der Probe bei Gleichgewichtsfeuchte zu einer relativen Luftfeuchte x [g]
- $m_0$  Masse der trockenen Probe [g]
- $w_{x\%}$  gravimetrischer Wassergehalt der Probe bei einer relativen Luftfeuchte x [%]

Für die Erstellung der Adsorptionskurven bzw. Desorptionskurven wurden die Ergebnisse von mehreren Einzelproben zu einem Mittelwert zusammengefasst. Folgende in Tabelle 5-6 dargestellten Variationsparameter wurden im Rahmen der Arbeit untersucht. Die Proben mit Chloridgehalten von 4 M.-%/z wurden mit einem geringeren Stichprobenumfang nachträglich hergestellt und sollen lediglich einen Anhaltswert für die Entwicklung der Sorptionsisotherme bei sehr hohen Chloridgehalten liefern.

Tabelle 5-6: Variationsparameter zur Bestimmung der Sorptionsisotherme von chloridhaltigem Beton

Zement	w/z	Chloridgehalt	Stichprobenumfang n
[-]	[-]	[M.-%/z]	[-]
CEM I	0,5	0	6
		2	10
		4	3
	0,6	0	6
		2	6
		4	3

Zement	w/z	Chloridgehalt	Stichprobenumfang n
[-]	[-]	[M.-%/z]	[-]
CEM III A	0,5	0	6
		2	6
		4	3
	0,6	0	4
		2	4

## 5.5 Versuche zur Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands der Probekörper

### 5.5.1 Allgemeines

Die Messung des spezifischen Widerstands in der Zwei-Elektronenanordnungen erfolgte über ein L-C-R-Messgerät LCR 4080 der Firma Voltcraft. Der Messbereich des Geräts liegt zwischen 1 mΩ und 10 MΩ bei einem maximalen Messfehler von 0,5 % im Messbereich zwischen 2 kΩ und 2 MΩ.

Zwischen den angeordneten Elektronen wird ein elektrisches Feld erzeugt. Eine Gleichstromquelle würde dabei zu einer Potentialdifferenz zwischen den Elektroden und damit zu einer Elektrodenreaktion führen. Um diese Effekte auszuschließen, erfolgte die Widerstandsmessung über einen angelegten Wechselstrom, der einen Stromfluss auch ohne Elektrodenreaktion ermöglicht. Bei der Wechselstrommessung handelt es sich im Grunde um die Erfassung der Impedanz, die sich aus einem Realanteil (Ohm'scher Widerstand) und einem frequenzabhängigen Imaginäranteil (Doppelschichtkapazitäten) zusammensetzt. Für die Messfrequenz in Beton hat sich gemäß [135] ein Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1.000 Hz als technisch sinnvoll herausgestellt. Im Rahmen der Arbeit wurden die Elektrolytwiderstände mit einer Messfrequenz von 1.000 Hz erfasst.

Die gemessenen Widerstände in [Ω] werden mithilfe einer für die Versuchsanordnung ermittelten Geometriekonstante gemäß Gleichung 5-2 (z. B. aus [36; 87]) in spezifische Widerstände umgerechnet.

$$\rho = R_a * Z \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$R_a$	absoluter Widerstand	[Ω]
$Z$	Geometriefaktor	[m]
$\rho$	spezifischer Widerstand	[Ωm]

Für die zwei Elektrodenmessung ergibt sich die Geometriekonstante aus dem Quotienten der stromdurchflossenen Querschnittsfläche und dem Elektrodenabstand, vgl. Gleichung 5-3.

$$Z = \frac{A}{l}$$

Gleichung 5-3

Z	Geometriefaktor	[m]
A	Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
l	Elektrodenabstand	[m]

### 5.5.2 Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands bei Ausgleichsfeuchte

Parallel zu der Bestimmung der Sorptionseigenschaften, vgl. Abschnitt 5.4, wurde an den Probekörpern „W-Cl-Single“ der spezifische Elektrolytwiderstand über die stirnseitig angeordneten Titanmischoxidbänder bestimmt.

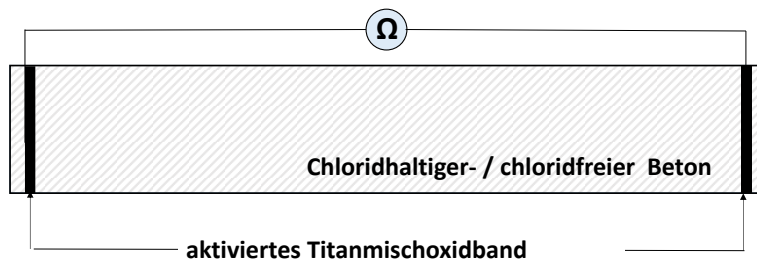


Abbildung 5-5: Schematische Messanordnung des Elektrolytwiderstands an der Probenserie „W-Cl-Single“

Über die eingebetteten Bänder erfolgte eine direkte Ankopplung an den Beton. Ein Verfälschen des Wassergehalts über einen Wassereintrag des Ankopplungsmedium konnte somit vermieden werden.

Die Messung erfolgte im Anschluss an die Gewichtsbestimmung. Die Auswertung erfolgte nach Gleichung 5-2. Aus der Geometrie der Probekörper ergibt sich für die Probekörper ein rechnerischer Geometriefaktor  $Z$  zu 0,018 m. Bei der Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands bei Ausgleichsfeuchte wurden jeweils die Messergebnisse aus den Einzelmessungen zu einem Mittelwert zusammengefasst.

### 5.5.3 Bestimmung der spezifischen Elektrolytwiderstände von Beton zum Nachweis der Austrocknung unter einer Beschichtung

Mit der Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands an der Edelstahl-Elektrodenleiter der Prüferserie „W-CI-Multi“ wurde das Austrocknungsverhalten des Betons bei unterschiedlichen Beschichtungssystemen und unterschiedlichen Referenzbedingungen untersucht. Die Widerstände wurden dabei zwischen den einzelnen Edelstahlanoden ( $X_1$  bis  $X_5$ ) abgegriffen, vgl. Abbildung 5-6.

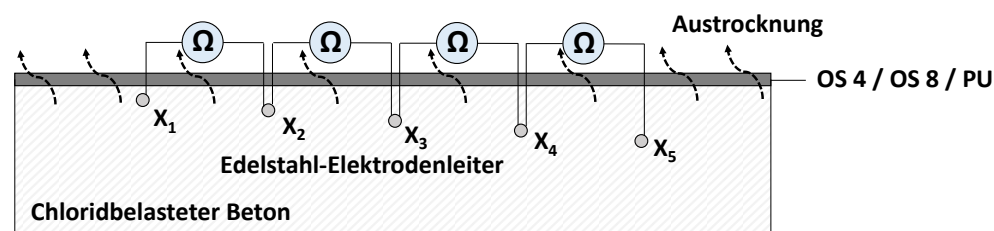


Abbildung 5-6: Schematische Messanordnung zur Bestimmung der Elektrolytwiderstände an der Probenserie „W-CI-Multi“

Nach einer dreimonatigen Konditionierung bei 98 % r. F. und anschließendem Aufbringen der Beschichtung erfolgte eine rd. zwölfmonatige Auslagerung der seitlich abgedichteten Probekörper bei einem definierten Laborklima von durchschnittlich 55 % r. F. und  $21\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ . Parallel wurden unbeschichtete Referenzprüfkörper über den gesamten Zeitraum bei 55 % r. F. und 98 % r. F. gelagert. Die Geometrie konstante der Elektrodenleiter wurde sowohl über eine FE-Berechnung mithilfe des Programms Comsol Multiphysics als auch über begleitende Versuche ermittelt. Sie beträgt für die Anodenleitern rd. 5 mm.

## 5.6 Elektrochemische Versuche zur Bestimmung der Korrosion

### 5.6.1 Bestimmung des freien Korrosionspotentials

Die Bestimmung des freien Korrosionspotentials  $E_{\text{Korr}}$  nach DIN EN ISO 8044 [108] an den Anoden ( $X_6$  und  $X_7$ ) der Prüferserie „W-CI-Multi“ wurde bei Abwesenheit von äußeren Summenströmen (Open Circuit Potential OPC) mit dem eingebauten Titanmischoxidband in Anlehnung an [136] und [137] als Quasireferenzelektrode (QRE) in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt, vgl. Abbildung 5-7. Das Korrosionspotential wurde jeweils vor der Bestimmung des Korrosionsstroms mit dem Potentiostaten Gamry Reference 600 über 60 Sekunden gemessen.

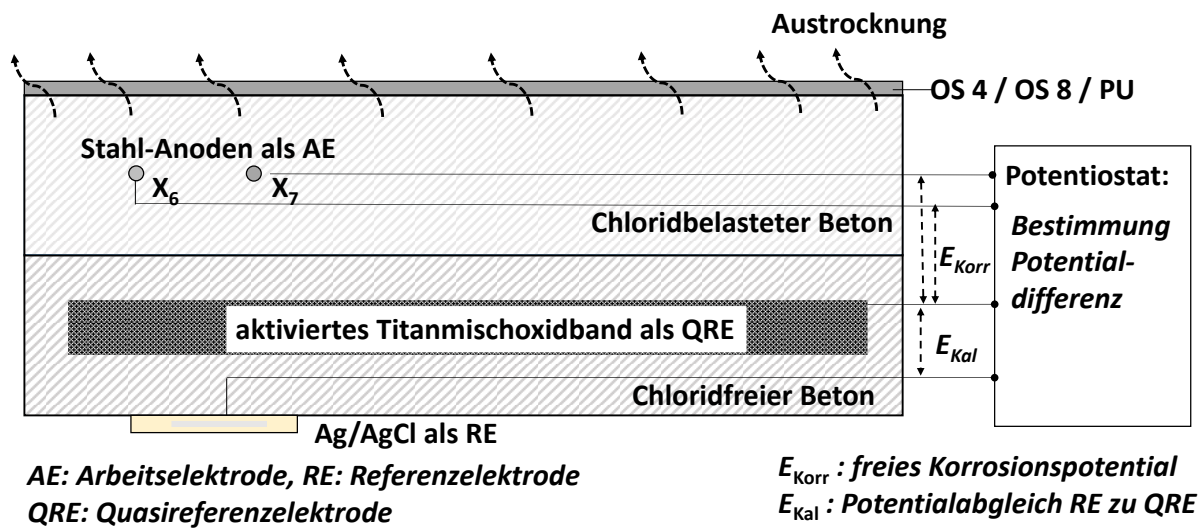


Abbildung 5-7: Schematische Messanordnung zur Bestimmung des freien Korrosionspotentials

Die Stabilität der QRE wurde über den Messzeitraum mittels von außen angekoppelter Silber/Silberchlorid(Ag/AgCl)-Referenzelektroden in monatlichen Abständen überprüft. Ebenso können die Titanmischoxidbänder als Kathoden zur Korrosionsstrommessung verwendet werden. Ein Spektrum üblicher freier Korrosionspotentiale bei Beton in Abhängigkeit vom Zustand in Bezug auf die Standardwasserstoffelektrode SHE zeigt Tabelle 5-7. Grundlage der Tabelle sind Veröffentlichungen aus [14; 36; 138; 139].

Tabelle 5-7: Korrosionspotentiale von Stahl in Beton

Zustand des Betons	Potential vs. SHE [mV]	
	Min.	Max.
feucht, chloridhaltig	-500	-100
feucht, chloridfrei	+100	+400
feucht, carbonatisiert	0	+400
trocken	+300	+500

Auf Grundlage der unterschiedlichen Randbedingungen, z. B. Elektrolytwiderstände, Porenstruktur und Chloridgehalte, zeigt die Literatur eine relativ große Bandbreite an freien Korrosionspotentialen im Beton. Zusätzlich wird das Korrosionspotential noch durch den Sauerstoffgehalt im Beton beeinflusst. Bei absolut wassergesättigten Betonen kann es zu einer Hemmung des Teilprozesses der Sauerstoffkorrosion kommen [140] und die Potentiale verschieben sich deutlich in negative Richtung bis -800 mV vs. SHE, ohne dass aktive Korrosionsprozesse ablaufen.

## 5.6.2 Bestimmung des Korrosionsstroms

Die zeitliche Zunahme des Elektrolytwiderstands des Betons über die Austrocknung sowie der Anstieg der freien Korrosionspotentiale an den Anoden ( $X_6$  und  $X_7$ ) der Prüfkörper „W-CI-Multi“ in Trockenlagerung geht theoretisch mit einer Abnahme der Treibspannung zwischen Anode und Kathode einher, was zu einer Reduktion des fließenden Stroms führt. Um die zeitliche Entwicklung der Korrosionsaktivität der eingebauten Stahlanoden qualitativ zu erfassen, wurden die Anoden mit den Titanmischoxidbändern als Kathode temporär kurzgeschlossen, vgl. Abbildung 5-8.

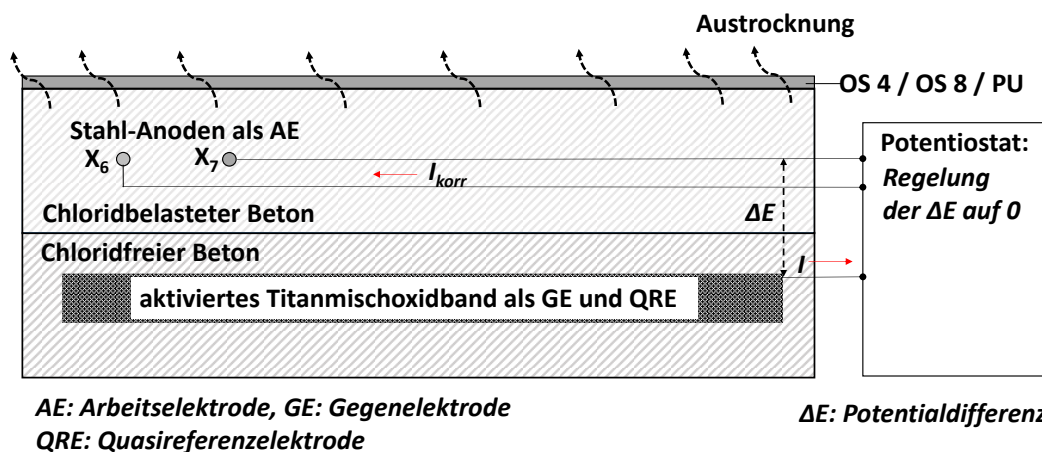


Abbildung 5-8: Schematische Messanordnung der Korrosionsstrommessung

Dieser zwischen der definierten Anode und der definierten Kathode fließende Elementstrom wurde in einer ZRA (Zero Resistance Amperemeter) -Messung mit einem Potentiostaten (Gamry Reference 600) erfasst.

Die Messung der Korrosionsströme erfolgt zu einem definierten Zeitpunkt nach der Herstellung eines temporären Kurzschlusses von Anode und Kathode (instationäre Korrosionsstrommessung). Da der Korrosionsstrom nach Herstellen des Kurzschlusses zunächst deutlich abfällt, ist es für die Bewertung der Ergebnisse wesentlich, dass die Messungen jeweils zum gleichen Zeitpunkt nach der Herstellung des Kurzschlusses durchgeführt werden. Hier wurde ein einheitlicher Zeitpunkt zur Messung des Korrosionsstroms von 120 sec für alle Messungen gewählt. Dieser Zeitpunkt führte zu einer weitgehenden Konvergenz gegen einen (stationären) Korrosionsstrom, während bei nicht vollständig konvergierenden Messungen der Korrosionsstrom auf der sicheren Seite überschätzt wird.

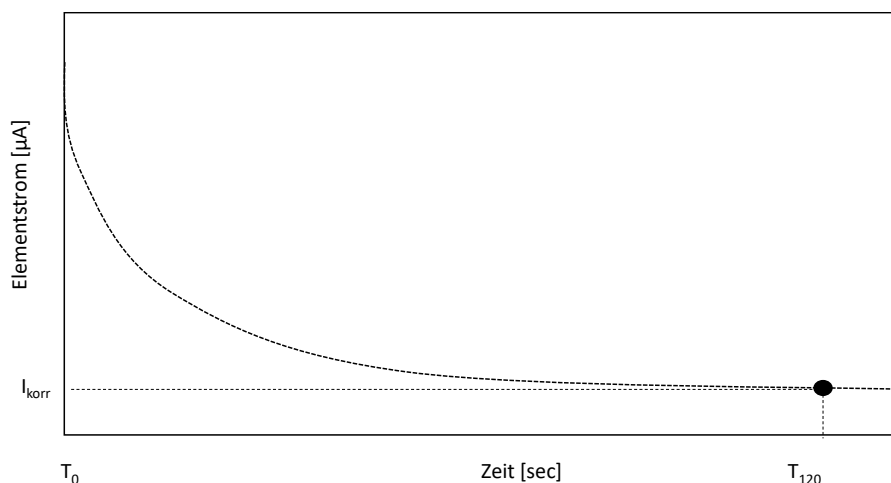


Abbildung 5-9: Prinzip der Elementstrombestimmung an der mit der Titanmischoxid-Kathode (TMMO) kurzgeschlossenen Anode in einer ZRA (Zero Resistance Amperemeter)-Messung

Bei der gemessenen Größe handelt es sich um den Makrokorrosions-Elementstrom zwischen der gezielt hergestellten Anode (Stahl in chloridhaltigem Beton) und einer Titanmischoxid-Kathode (Anoden/Kathodenverhältnis 3:100). Dabei werden die Korrosionsstromanteile, die sich aufgrund kathodischer Oberflächenbereiche auf dem als Anode wirkenden Element ausbilden (Eigenkorrosion), nicht erfasst. Demzufolge handelt es sich bei dem gemessenen Strom formell um einen Elementstrom, der nur einen Teil des tatsächlichen Korrosionsstroms darstellt. Nachfolgend wird aber vereinfachend die Bezeichnung Korrosionsstrom verwendet. Zur Umrechnung der Korrosionsstromdichten aus den Korrosionsströmen (Elementströmen) wurden die Anoden nach Beendigung der Versuchsreihe teilweise ausgebaut und die Korrosionsnarben unter einem Auflichtmikroskop vermessen. Die Korrosionsstromdichten wurden daraufhin auf die gemessenen Anodenflächen bezogen. Der Messung des Korrosionsstroms liegen jeweils vier Einzelproben zugrunde, aus denen der Mittelwert sowie die Standardabweichung und die Streubreiten ermittelt wurden, siehe Anhang B.

### 5.6.3 Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands

Die Messung des linearen Polarisationswiderstands ermöglicht die Charakterisierung des Korrosionszustands der Anoden ( $X_6$  und  $X_7$ ). Bei Abwesenheit äußerer Summenströme kann dieser, wie in Abschnitt 4.4.5 beschrieben, zur Abschätzung des Korrosionsabtrags herangezogen werden. Der lineare Polarisationswiderstand wurde in einem potentiodynamischen Versuch in Anlehnung an DIN 50918:2018-09 [141] an den Proben der Reihe „W-Cl-Multi“ bestimmt. Hierbei wurde in einer Drei-Elektrodenanordnung, bestehend aus Anode, Referenzelektrode (Ag/AgCl) und einer Gegenelektrode aus Titanmischoxid, vgl. Abbildung 5-10, das Potential über die Zeit linear geändert.

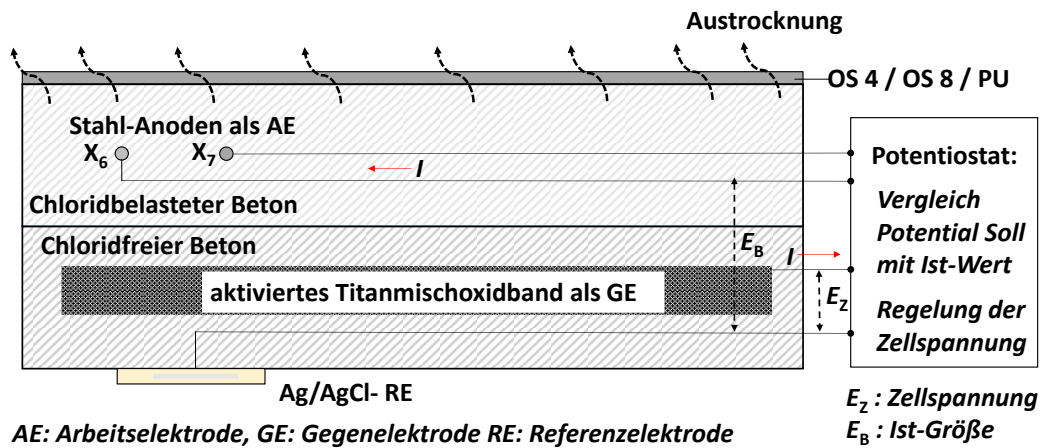


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der potentiostatischen Arbeitsweise bei der Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands

Unter der Bedingung einer geringen Polarisierung hängt die Steigung der Strom-Spannungskurve von der Austauschstromdichte ab. Zur Ermittlung des Polarisationswiderstands wurde das Potential um  $\pm 10$  mV um das freie Korrosionspotential linear ausgelenkt und der Elementstrom als Antwort auf die Potentialverschiebung aufgezeichnet. Über das freie Korrosionspotential wurde anschließend IR-kompensiert im linearen Bereich die Steigung der Tangente und damit der lineare Polarisationswiderstand am freien Korrosionspotential bestimmt, vgl. Abbildung 5-11.

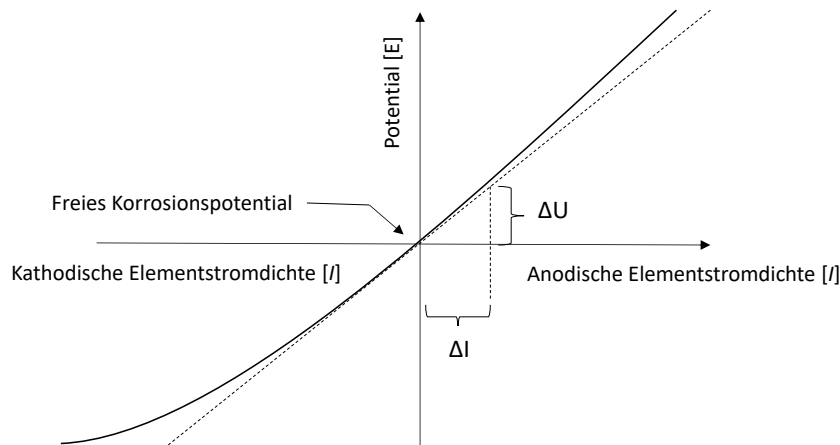


Abbildung 5-11: Exemplarische Darstellung der Bestimmung des Polarisationswiderstands am freien Korrosionspotential

Angst und Büchler weisen in [142] darauf hin, dass die Anwendung der Stern-Geary-Gleichung häufig zu einer Fehlinterpretation der Korrosionsgeschwindigkeit führt. So muss berücksichtigt werden, dass der zugeführte Strom in einem nicht zu vernachlässigenden Anteil durch die Kathode fließt. Auch kommen Heitz und Schwenk in [143] zu dem Schluss, dass die aus dem Polarisationswiderstand



abgeleiteten Korrosionsgeschwindigkeiten bei Lochkorrosion nicht mit den tatsächlich festgestellten Korrosionsschäden korrelieren. Entsprechend wurde der Polarisationswiderstand der Stahlanoden hauptsächlich zur Charakterisierung des Korrosionszustands herangezogen.

#### 5.6.4 Bestimmung der Korrosionskinetik mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie

Mit der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS-Messung) wird im Rahmen der Arbeit die Kinetik der elektrochemischen Vorgänge genauer charakterisiert. Im Korrosionssystem Stahlbeton wird der Bewehrungsstahl über ein breites Frequenzspektrum mit einer sinusförmigen Wechselfspannung angeregt. Ausgehend von der gewählten Auslenkung des Potentials um das freie Korrosionspotential und der erfassten Elementstromantwort ergibt sich die Impedanz, vgl. Gleichung 5-4, für den jeweiligen Frequenzbereich. Eine detaillierte Beschreibung der EIS-Messung wird z. B. in [144; 145] gegeben.

$$z(\omega) = \frac{E_t}{I_t} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

$z(\omega)$	Impedanz	[ $\Omega$ ]
$E_t$	Potentialanregung ( $\Delta E \sin(\omega t)$ )	[V]
$I_t$	Stromantwort ( $\Delta I \sin(\omega t + \varphi)$ )	[A]

Die Messanordnung entspricht bei der durchgeführten EIS-Messung einer Drei-Elektrodenmessung, Abbildung 5-12.

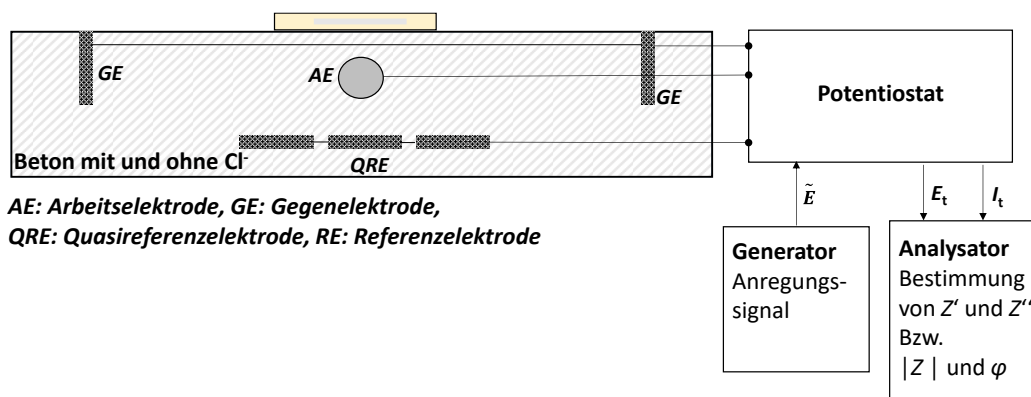


Abbildung 5-12: Schematische Darstellung des Messaufbaus bei der EIS-Messung an der Probenserie „W-CI-Plus“

In Anlehnung an Boukamp [146] wird für eine zerstörungsfreie und stationäre Messung eine kleine Amplitude und damit eine geringe Polarisierung des Stahls

gewählt, sodass effektiv die Korrosionsneigung im Ruhezustand ermittelt wird. Die Ergebnisse der EIS-Messung werden in einem kartesischen Bode-Diagramm dargestellt. Hierbei wird auf der Abszisse die Frequenz dargestellt und auf der Ordinate sowohl der Phasenwinkel als auch die Impedanz. Alternativ wird ein vektorisiertes Nyquist-Diagramm verwendet, bei dem auf der Abszisse der Real-Anteil der Impedanz und auf der Ordinate der Imaginär-Anteil der Impedanz aufgetragen wird. Abbildung 5-13 zeigt die beiden Diagramme für eine beispielhafte EIS-Messung am Korrosionssystem Stahlbeton.

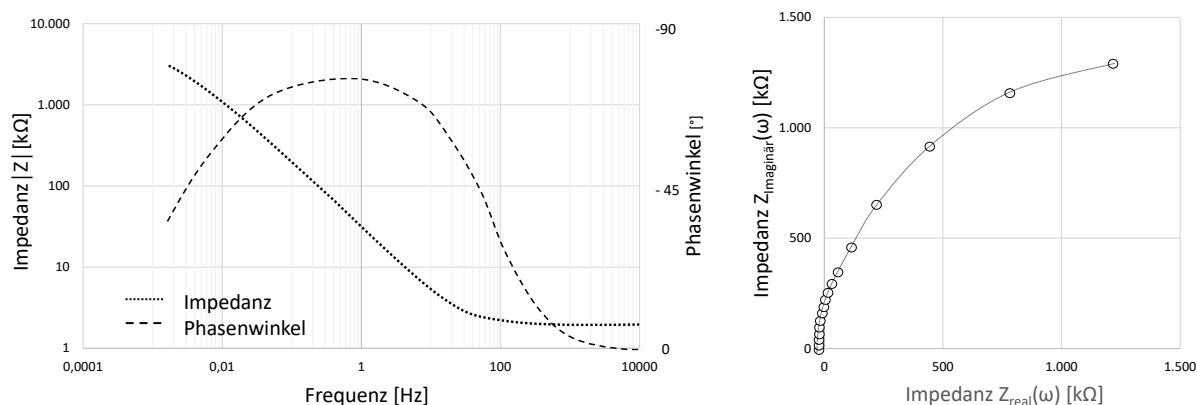


Abbildung 5-13: Ergebnisse einer EIS-Messung an Stahlbeton im Bode-Diagramm (links) und im Nyquist-Diagramm (rechts)

Die Auswertung der primären Parameter wie der Real-Anteil, Imaginär-Anteil, Phasenwinkel und Ohm'sche Widerstand kann für einfache Messanordnungen direkt aus der Messung abgelesen werden. Für eine detaillierte Interpretation der Messdaten wird ein Ersatzschaltbild mit entsprechenden elektrischen Bausteinen erstellt, mit dessen Hilfe die physio-chemischen Vorgänge über eine Funktion beschrieben werden sollen. Über die gezielte Variation von Parametern wird die Funktion angepasst, bis der Fehler, der sogenannte Godness of Fit, zwischen dem modellierten Kurvenverlauf und den Messdaten möglichst gering ist. Diese Kurvenanpassung wird als Fit bezeichnet. Mathematisch können unterschiedliche Modelle zu einer gleich guten Kurvenanpassung führen. Entsprechend ist es wichtig, dass das gewählte Modell auch den physio-chemischen Gegebenheiten entspricht. Für Stahl in Lösung kann dies nach [147] und [148] beispielsweise über Ohm'sche Widerstände und Kondensatoren im Randles-Ersatzschaltbild für Stahl in Lösung erfolgen, vgl. Abbildung 5-14.

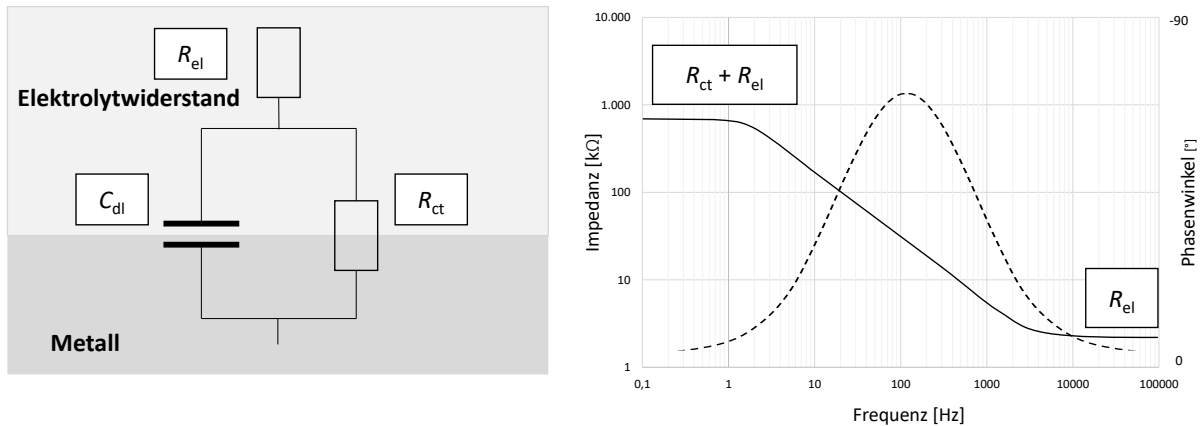


Abbildung 5-14: Schematische Darstellung der Randles-Zelle und dazugehöriges Bode-Diagramm

Sagues [15; 149] empfiehlt für ein nicht ideales Kondensator-Verhalten die Verwendung eines sogenannten konstanten Phasenelements (engl. Constant in Phase Elements, CPE), welches eine inhomogene Kapazität beschreibt und einen konstanten Phasenwinkel kleiner  $90^\circ$  aufweist [150]. Auch Feliu et al. konnten in [151] und [152] mittels CPE geeignete Ersatzschaltbilder für das Korrosionssystem Stahlbeton erzeugen. Tabelle 5-8 gibt eine Auswahl an Ersatzschaltbildern, die in der Literatur für die Beschreibung des Korrosionssystems Stahl in Beton häufig verwendet werden. Ein Auswahlkriterium für das zu verwendende Ersatzschaltbild ist die Anzahl der genutzten Schaltelemente. Generell sind Systeme zu bevorzugen, die eine möglichst einfache Struktur aufweisen. Dies kann auf der anderen Seite dazu führen, dass das Modell die Messergebnisse nur ungenügend abbildet. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit zwischen einfacher Struktur und dem Godness of Fit abzuwägen.

Tabelle 5-8: Gebräuchliche Ersatzschaltbilder aus der Literatur für das Korrosionssystem Stahl/Beton

Nr.	Ersatzschaltbild	Legende	Lit.
1		$R_{el}$ Elektrolytwiderstand des Betons $R_f$ Polarisationswiderstand in der Passivschicht $R_{ct}$ Durchtrittswiderstand Korrosionsstelle $C_f$ Kapazität im Bereich der Passivschicht $C_{dl}$ Kapazität im Bereich der elektrischen Doppelschicht	[153]
2		$R_{el}$ Elektrolytwiderstand des Betons $R_f$ Polarisationswiderstand in der Passivschicht $R_{ct}$ Durchtrittswiderstand Korrosionsstelle $C_{CPE}$ CPE im Bereich der Passivschicht $C_{dl}$ Kapazität im Bereich der elektrischen Doppelschicht	[154]

Nr.	Ersatzschaltbild	Legende	Lit.
3		$R_{el}$ Elektrolytwiderstand des Betons $R_{ct}$ Durchtrittswiderstand Korrosionsstelle $C_{el}$ Kapazität im Bereich des Elektrolyten $C_{CPE}$ CPE im Bereich der elektrischen Doppelschicht	[114]
4		$R_{el}$ Elektrolytwiderstand des Betons $R_{ct}$ Durchtrittswiderstand Korrosionsstelle $C_{CPE,el}$ CPE im Bereich des Elektrolyten $C_{CPE}$ CPE im Bereich der elektrischen Doppelschicht	[87]

Die dargestellten Ersatzschaltbilder bestehen aus einzelnen Schaltelementen. Hierbei wird der kapazitive Anteil der Impedanz mit  $C$  und der Ohm'sche Anteil mit  $R$  bezeichnet wird, wobei Gleichung 5-5 und Gleichung 5-6 gilt.

$$Z_C(\omega) = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad \text{Gleichung 5-5}$$

$Z_C(\omega)$	Scheinimpedanz	[ $\Omega$ ]
$j^2$	-1	[-]
$\omega$	Geometriefaktor	[rad/s]
$C$	Kapazität	[F]

$$Z_\Omega(\omega) = R \quad \text{Gleichung 5-6}$$

$R$	Ohm'scher Widerstand	[ $\Omega$ ]
-----	----------------------	--------------

Das Constant Phase Element wird mit  $C_{CPE}$  bezeichnet, sein Anteil an der Impedanz des Systems ergibt sich aus Gleichung 5-7

$$Z_{CPE}(\omega) = \frac{1}{(j \cdot \omega)^\alpha \cdot Y_0} \quad \text{Gleichung 5-7}$$

$\alpha$	Exponent	[-]
$Y_0$	Koeffizient zur Beschreibung des Constant Phase Element	[abhängig von $\alpha$ ]

In Abhängigkeit vom Exponenten  $\alpha$  ergibt sich die Eigenschaft von  $Y_0$ . Für  $\alpha = 1$  hat das CPE-Element die gleichen Eigenschaften wie ein Kondensator  $C$  mit einer Kapazität  $F$ . Für  $\alpha = 0$  ergibt sich ein rein Ohm'scher Widerstand. Für ein  $\alpha = 0,5$

ergibt sich eine reine Diffusionsimpedanz und das CPE-Element wird zu einem sogenannten Warburg-Element.

Mit den in Tabelle 5-8 dargestellten Systemen Nr. 1 und Nr. 2 lassen sich wassergesättigte/feuchte Stahlbetonsysteme hinreichend detailliert beschreiben. Für trockene Systeme liefern sie unter Umständen keine ausreichende Beschreibung, da der Beton als Elektrolyt in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit neben seiner Funktion als Widerstand auch einen diffusiven und kapazitiven Anteil besitzt, vgl. [114] und [87]. Diesem Umstand tragen die Ersatzschaltbilder Nr. 3 und Nr. 4 Rechnung, die im Bereich des Elektrolyten eine Kapazität bzw. ein CPE-Element einfügen.

In Abhängigkeit vom Trocknungs- und Korrosionszustand wurden die Schaltbilder aus den dargestellten Modellen kombiniert, sodass für die Auswertung der untersuchten Systeme folgende, in Abbildung 5-15 dargestellte Ersatzschaltbilder verwendet wurden. Hierbei wird für passive Systeme das in Abbildung 5-15 Teilbild a) dargestellte Modell der in Reihe geschalteten Elemente gewählt.  $R_{el}$  entspricht dabei dem Elektrolytwiderstand des Betons,  $R_F$  dem Ohm'schen Widerstand der Passivschicht und  $R_{ct}$  dem Durchtrittswiderstand zwischen Metall und der Oxidschicht.

Im depassivierten Zustand, Abbildung 5-15 Teilbild b), mit einer lokalen Auflösung der Oxidschicht, wird der Elektrolytwiderstand mit dem Widerstand der Lösung in der lokalen Fehlstelle der Passivschicht sowie mit dem Durchtrittswiderstand und dem CPE-Element in Reihe geschaltet, während ein Kondensator und der Diffusionsanteil über die Oxidschicht parallel geschaltet werden.

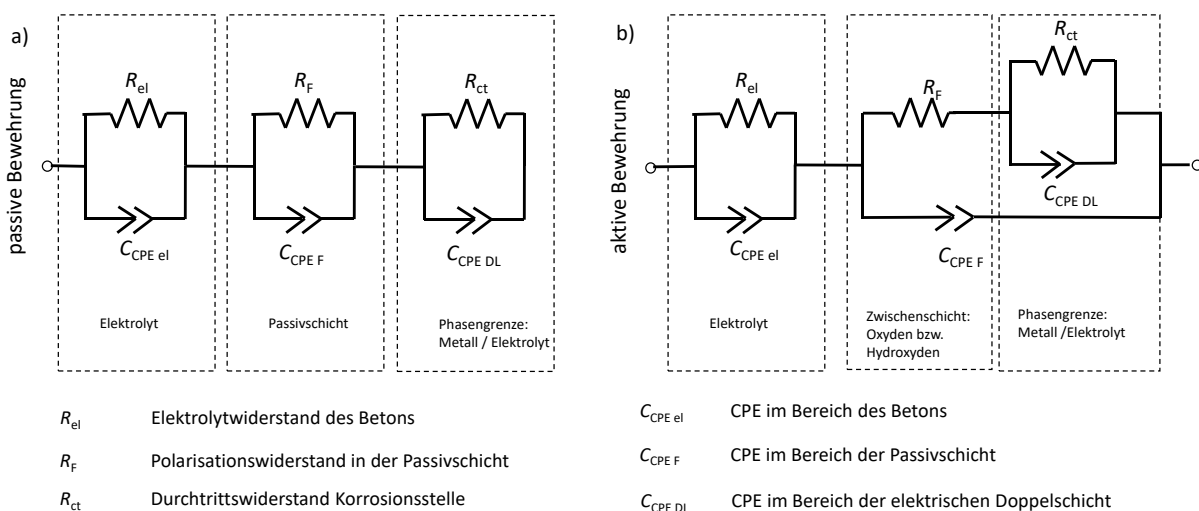


Abbildung 5-15: Im Rahmen der Arbeit verwendete Ersatzschaltbilder für das untersuchte Korrosionssystem Stahl und Beton für passive und aktive Bewehrung.

Mit den eingebauten Constant in Phase Elementen im Bereich des Elektrolyten kann über den Exponenten  $\alpha$  der Beitrag der Diffusion oder der Kapazität an der Impedanz

des Betons ermittelt werden. Über den Verlauf der Austrocknung soll weiter untersucht werden, welche Funktion die CPEs der Zwischenschicht und der Phasengrenze übernehmen. In der weiteren Betrachtung wird der Durchtrittswiderstand  $R_{ct}$  mit den ermittelten Polarisationswiderständen aus der linearen Polarisationsmessung verglichen, um das entwickelte Modell zu verifizieren.

## 5.7 Optische Bestimmung der Anodenfläche der Korrosionsnarben

Zur Abschätzung der Makrozellkorrosionsstromdichte aus dem gemessenen Elementstrom ist die Kenntnis der depassivierten Stahloberfläche und der damit anodisch wirkenden Bereiche eine maßgebende Kenngröße, die zu Ende des Versuchs durch optische Vermessung der Narbengeometrie bestimmt werden kann. Zur Bestimmung der wirksamen Anodenfläche wurden die Stahlelektroden im Rahmen dieser Arbeit ausgebaut, gemäß DIN 50905-1:2009 [155] gereinigt und mithilfe eines Auflichtmikroskops Keyence VHX 6000 planimetrisch vermessen, vgl. Abbildung 5-16.

Da der Ausbau der Anoden erst nach Beendigung der Messreihen erfolgen konnte, entspricht die ermittelte Korrosionsfläche der sich maximal ausbreitenden Anodenfläche über den Messzeitraum. Vereinfacht wird diese Fläche über den gesamten Messzeitraum als Anodenfläche angesetzt, auch wenn sie zeitweise passiv vorlag.



Abbildung 5-16: Analyse und Quantifizierung der korrosionsgeschädigten Flächenanteile der ausgebauten Stahlanoden

## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 5 dargestellten Untersuchungsmethoden an den konzipierten Probekörpern mit den in Kapitel 4 vorgestellten elektrochemischen Kenngrößen der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton vorgestellt. Die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse erfolgen maßgeblich deskriptiv über die Bildung von Mittelwerten/Medianwerten sowie über die Darstellung der Standardabweichungen und daraus abgeleiteten Streubreiten. Im Detail können die Ergebnisse in Anhang B nachvollzogen werden. Im Rahmen der Versuchskonzeption wurde durch die geplante Variation der Parameter eine Bewertungsmöglichkeit für einen breiten Anwendungsbereich der Ergebnisse angestrebt. Auch wenn die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse maßgeblich von den verwendeten Ausgangsstoffen und den Randbedingungen wie Klima und Luftfeuchte abhängt, wird den Ergebnissen für die entsprechenden Parameter ein verallgemeinernder Charakter verliehen. Ein Teil der Abbildungen wurde bereits in [156] und [157] veröffentlicht.

### 6.2 Sorptionsisotherme

#### 6.2.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, wird der Feuchtehaushalt des Betons bei der Austrocknung unter einer Beschichtung hauptsächlich durch die Desorption von Wasser in die Umgebungsluft bestimmt. Die Durchführung der Sorptionsversuche erfolgte an der in Abschnitt 5.3.1 dargestellten Versuchsreihe „W-Cl-Single“.

Die Feuchtesorption von chloridfreiem Beton wird maßgeblich durch das Porenvolumen und die Porenradienverteilung bestimmt. Entsprechend werden als Parameter die Zementart und der Wasserzementgehalt variiert.

Einen weiteren Einfluss auf das Porenvolumen hat das Betonalter. Die Bestimmung der Sorptionsisotherme erfolgte über einen Zeitraum von rd. einem Jahr. Um den Einfluss der Hydratation bei den Untersuchungen zu reduzieren, wurden die Probekörper nach Herstellung und einer Hydratationsphase von 7 Tagen unter Wasser für weitere 84 Tage bei einer relativen Feuchte von 98 % gelagert. Zum abschließenden Erreichen der Wassersättigung wurden die Probekörper bis zur Massekonstanz unter Wasser im Vakuum gelagert. Eine weitere Berücksichtigung der Alterung erfolgt bei der Ergebnisdarstellung und der Auswertung der Ergebnisse nicht.

Die im Folgenden abgebildeten Feuchtespeicherfunktionen stellen den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt der Probe und der Luftfeuchtigkeit dar. Um die Proben miteinander vergleichen zu können, wird der Wassergehalt  $w$  der Probe auf den maximalen Wassergehalt infolge Vakuumsättigung  $w_{\max}$  bezogen. Der sich daraus ergebende relative Wassergehalt wird in % angegeben.

## 6.2.2 Einfluss der Zementart und des Wasserzementgehalts auf die Sorptionsisotherme

Abbildung 6-1 zeigt exemplarisch die ermittelten Wassergehalte als Gleichgewichtsfeuchte mit der entsprechenden Lagerungsfeuchte bei der Austrocknung eines Betons CEM I 42,5 N, w/z 0,5, 0 M.-% Cl<sup>-</sup>/z links und eines Betons CEM III 42,5 N, w/z 0,5, 0 M.-% Cl<sup>-</sup>/z rechts. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abbildung 6-1 über Box-Plots. Neben dem Median lassen sich hierbei das untere und obere Quantil sowie die Spannweite des Datensatzes ablesen.

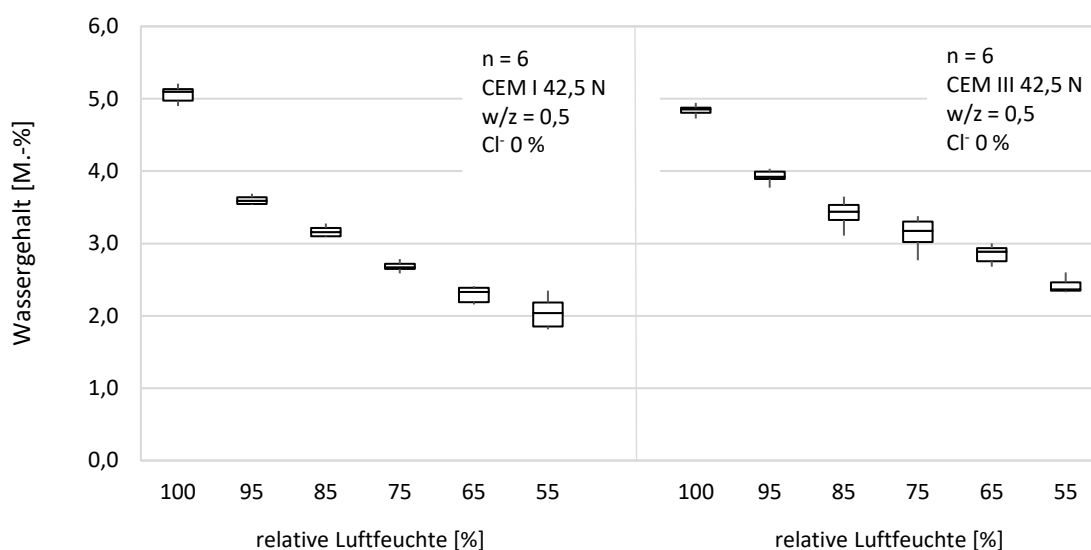


Abbildung 6-1: Ergebnisse der Desorptionsmessungen an Probekörpern mit CEM I (links) und CEM III (rechts), w/z = 0,5 und 0 M.-% Cl<sup>-</sup>/z

Im Rahmen der Feuchtedesorption konnten in Abhängigkeit von der Zementart für die jeweils gleichen relativen Luftfeuchtebedingungen deutliche Unterschiede bei den ermittelten Wassergehalten festgestellt werden. Abbildung 6-1 zeigt bei Wassersättigung der untersuchten Proben für den CEM I-Beton höhere Wassergehalte als bei dem vergleichbaren CEM III-Beton. Dies ist ursächlich auf die unterschiedliche Porenstruktur der Betone zurückzuführen.

Weiter kann über die Austrocknung festgestellt werden, dass der hüttensandhaltige Beton im Vergleich zu dem untersuchten Portlandzementbeton bei der Lagerung in trockenem Umgebungsklima höhere Wassergehalte als Ausgleichsfeuchte aufweist. Aufgrund des Dampfdruckgefälles in kleineren Poren, vgl. hier vereinfacht die Kelvin-Thomson-Formel in Gleichung 4.1 in Abschnitt 4.2.2, kann unter der Annahme zylindrischer Poren dieser Zusammenhang auch mathematisch beschrieben werden.

Baupraktisch bedeutet dies, dass der CEM III-Beton in dem untersuchten Luftfeuchtespektrum weniger stark austrocknet als ein vergleichbarer CEM I-Beton. Dies zeigt sich entsprechend auch in Form der in Abbildung 6-2 dargestellten



Sorptionsisothermen für den untersuchten chloridfreien Beton mit einem w/z-Wert von 0,5.

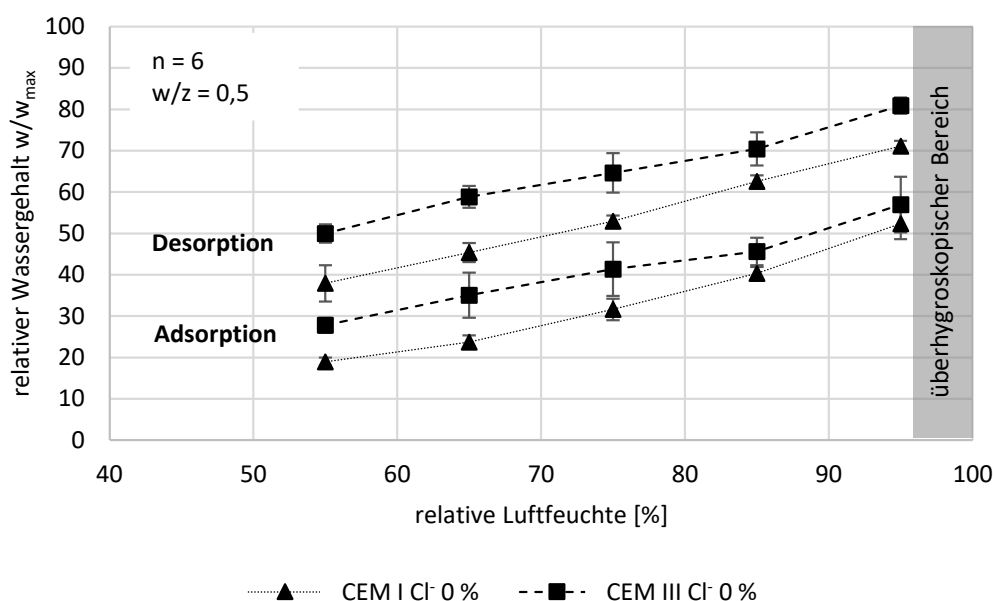


Abbildung 6-2: Vergleich der Sorptionsisotherme in Abhängigkeit der Zementart CEM I und CEM III; w/z = 0,5

Im Vergleich der beiden Feuchtespeicherfunktionen zeigt der CEM III-Beton bei der Desorption im Bereich von 85 % r. F. bis 65 % r. F. einen deutlich abflachenden Kurvenverlauf. Eine Änderung des Krümmungsverlaufs (Wendepunkt) kann bei rd. 75 % r. F. festgestellt werden. Bei der Adsorption ist dieser Bogenwechsel bei einer relativen Feuchte von 85 % r. F. feststellbar. Der Verlauf des Graphen erklärt sich aus der Belegung der sehr kleinen Porenräume auch schon bei entsprechend geringeren Luftfeuchten mit einer monomolekularen Wasserschicht und einer dann eintretenden Kapillarkondensation. Erst bei deutlich höheren Feuchten wird in den verbleibenden größeren Poren ein mehrschichtiger Wasserfilm eingelagert.

Der Funktionsverlauf des CEM I-Betons flacht erst im Bereich zwischen 55 % r. F. und 65 % r. F. deutlich ab, ein Wendepunkt der Funktion ist bei den untersuchten praxisrelevanten Luftfeuchten nicht feststellbar.

Zwischen Desorption und Adsorption ergibt sich, unabhängig von der untersuchten Zementart, eine deutliche Hysterese.

Die ermittelten Kurvenverläufe zeigen sowohl für den CEM I-Beton als auch für den CEM III-Beton eine typische Charakteristik. Dies gilt bei der Desorption unabhängig vom w/z-Wert, vgl. Abbildung 6-2 mit Abbildung 6-3. Bei der Adsorption liegen die Feuchtespeicherfunktionen der beiden Zementarten für höhere Wasserzementgehalte im Bereich der Streubreite der jeweils anderen Funktion und unterscheiden sich nicht auffällig. Im Mittel liegen die relativen Wassergehalte des CEM III-Betons bei hohen Wasserzementgehalten jedoch über denen des CEM I-Betons.

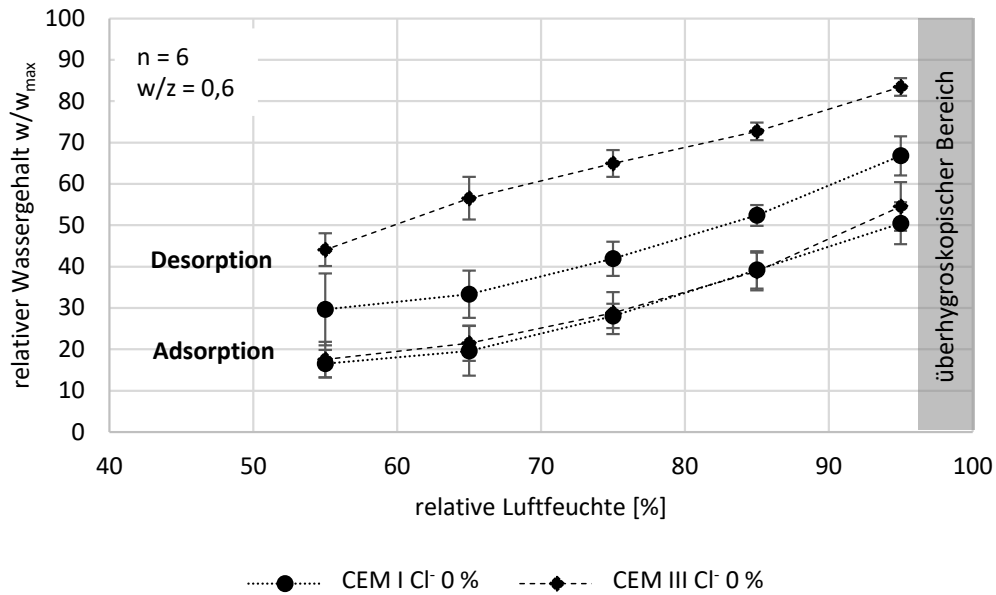


Abbildung 6-3: Vergleich der Sorptionsisotherme in Abhängigkeit von der Zementart CEM I und CEM III A;  $w/z = 0,6$

Mit steigendem  $w/z$ -Wert erhöht sich der Anteil der Kapillarporen im Beton, da ein höherer Anteil des Wassers nicht mehr physikalisch gebunden wird. Hieraus lässt sich eine Auswirkung auf das Sorptionsverhalten des Betons erwarten. Exemplarisch für den Einfluss des  $w/z$ -Werts werden die Sorptionsisothermen für einen chloridfreien CEM I-Beton in Abbildung 6-4 dargestellt.

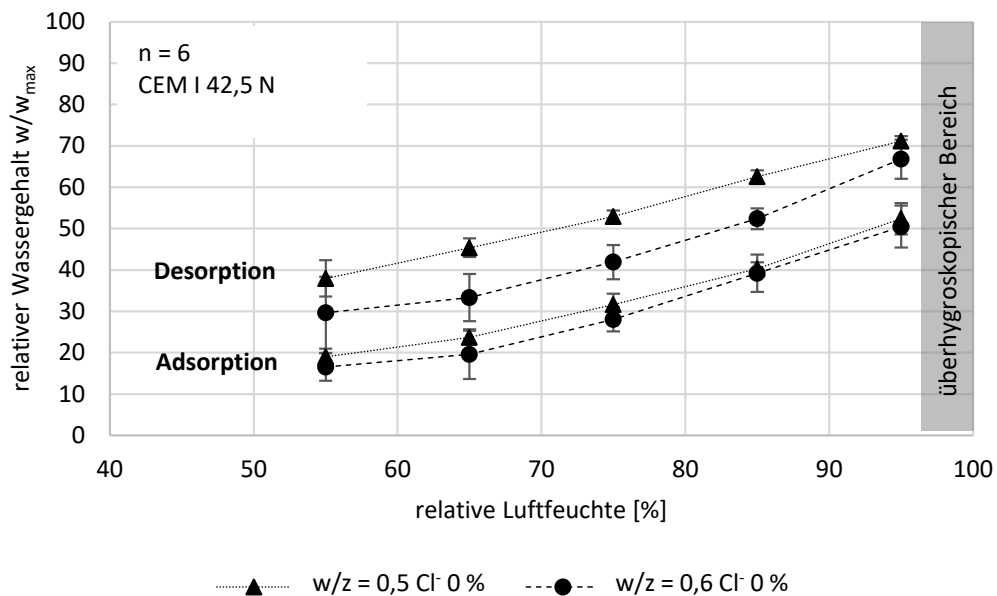


Abbildung 6-4: Vergleich der Sorptionsisothermen in Abhängigkeit vom  $w/z$ -Wert an CEM I-Beton ohne Chlorid

Der Vergleich der Betone mit unterschiedlichen  $w/z$ -Werten zeigt einen deutlichen Unterschied im Verlauf der Desorptionskurve. Trotz des absolut höheren Ausgangswassergehalts bei Wassersättigung, vgl. Tabelle 5-3, zeigt Beton mit hohem  $w/z$ -Wert bei hohen Luftfeuchten ein reduziertes Wasserrückhaltevermögen. Dies ist auf Porenbelegungseffekte und die Porengröße zurückzuführen. Bei der Adsorption führt der höhere Kapillarporenanteil im Bereich von Luftfeuchten bis 75 % r. F. zu einer geringeren Wasseraufnahme.

Die im Rahmen der Untersuchung festgestellten Erkenntnisse zur charakteristischen Ausprägung des Kurvenverlaufs bei den CEM III-Betonen decken sich gut mit Ergebnissen aus der Literatur, z. B. von Kast und Jokisch [62], die für feinporige Strukturen ebenfalls einen entsprechend kennzeichnenden Verlauf feststellen konnten. Auch Kapteina [158], Wittmann [159], Rucker Gramm [53] und Zhang [160] zeigen für Betone mit unterschiedlichen  $w/z$ -Werten schematische Feuchtespeicherfunktionen, die mit den hier festgestellten Erkenntnissen gut in Einklang gebracht werden können.

### 6.2.3 Einfluss des Chloridgehalts auf die Sorptionsisotherme

Nach Darstellung des Einflusses der betonspezifischen Parameter Zementart und  $w/z$ -Wert wird im Folgenden der Einfluss des Chloridgehalts auf die Sorptionsisotherme bewertet. Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse der Sorptionsisotherme der untersuchten Betonsorte CEM I,  $w/z = 0,5$  chloridfrei und moderat chloridbelastet (2 M.-%/z).

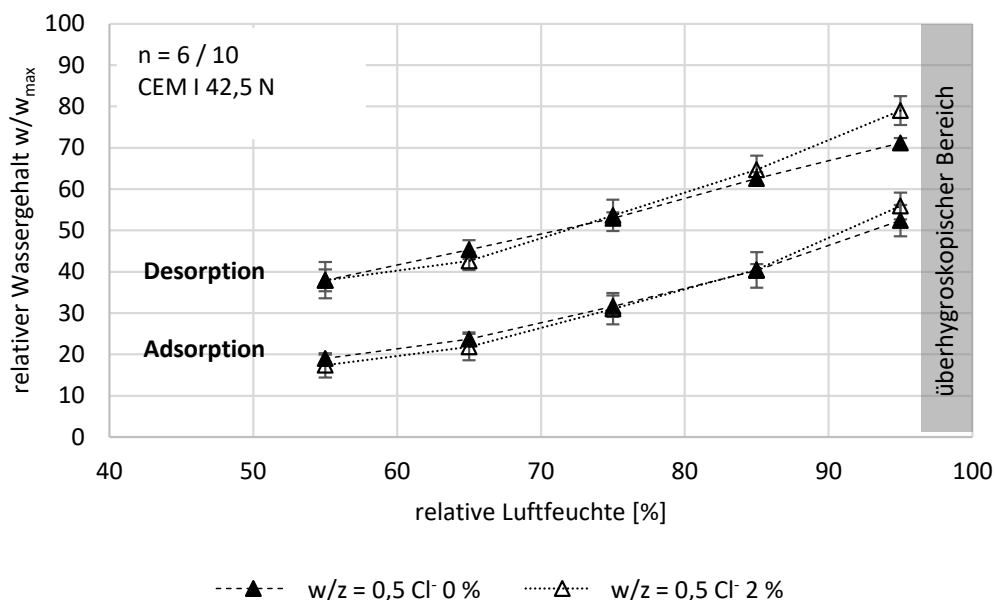


Abbildung 6-5: Sorptionsisotherme CEM I,  $w/z = 0,5$  bei 0 M.-% Cl/z und 2 M.-% Cl/z

Die vergleichende Darstellung der beiden Sorptionsisothermen in Abbildung 6-5 zeigt für die untersuchten Parameter eine ausgeprägte Hysterese zwischen dem

Desorptionsverlauf und der Adsorptionsverlauf. Der untersuchte Beton mit einem Chloridgehalt von 2 M.-%/z weicht in seinem Desorptions- wie auch Adsorptionsverlauf nur in einem geringen Maße von dem chloridfreien Beton ab. Im Bereich hoher Luftfeuchten zeigt sich der Gradient der Desorptionsisotherme des chloridhaltigen Betons steiler. Der Chloridgehalt verschiebt den Deliqueszenzpunkt aus dem überhygroskopischen Bereich in Richtung 95 % r. F., was bis zu einer relativen Luftfeuchte von 85 % zu höheren Wassergehalten im Vergleich zu dem untersuchten chloridfreien Beton führt. Bei der Adsorption zeigt sich der Gradient der Wasseraufnahme für den chloridhaltigen Beton ebenfalls steiler, bei insgesamt geringeren Differenzen zum chloridfreien Beton. Erst im Bereich einer relativen Feuchte von 95 % erreicht der chloridbelastete Beton im Vergleich zu dem chloridfreien Beton einen erkennbar erhöhten Wassergehalt. Eine sprunghafte Wassergehaltserhöhung, wie sie für NaCl z. B. in [71] für einen Bereich um 75 % r. F. beschrieben wird, ist für moderate NaCl-Gehalte nicht zu erwarten.

Ein deutlicher Einfluss auf den Sorptionsverlauf bei gleicher Betonzusammensetzung kann für den untersuchten Chloridgehalt von 4 M.-%/z festgestellt werden, vgl. Abbildung 6-6. Der mit hohen Chloridgehalten belastete Beton zeigt bei Desorption im Bereich von 95 % r. F. mit einer Wassersättigung von rd. 90 % einen deutlich höheren Sättigungsgrad als der vergleichbare chloridfreie Beton. Ab einer relativen Luftfeuchte von 85 % nähern sich die Sättigungskurven an, wobei der chloridhaltige Beton bis zu einer Luftfeuchte von 55 % über dem Sättigungsgrad des chloridfreien Betons liegt.

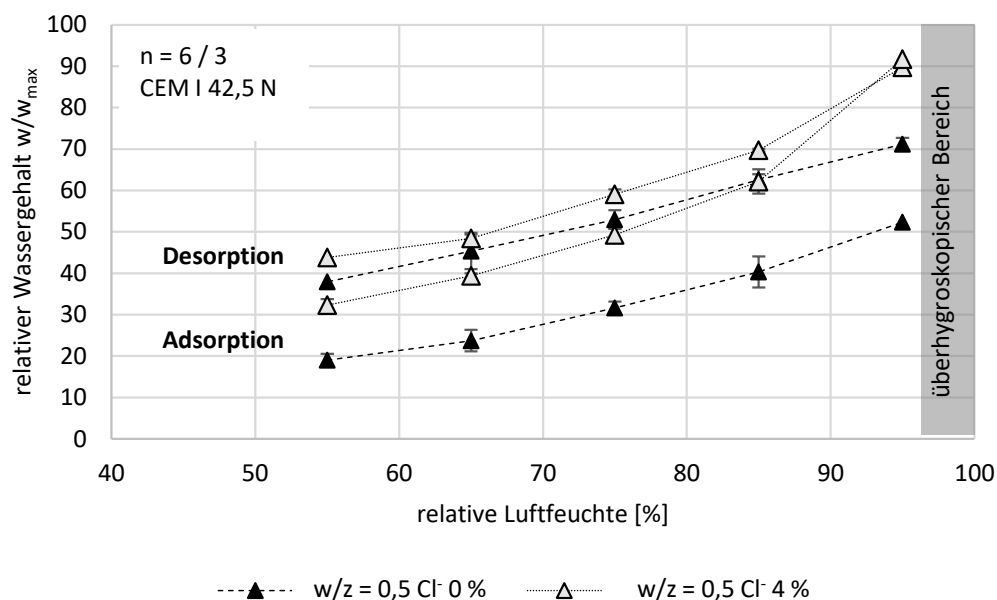


Abbildung 6-6: Sorptionsisotherme CEM I, w/z = 0,5 bei 0 M.-% Cl-/z und 4 M.-% Cl-/z

Bei der Adsorption führt der hohe Chloridgehalt von 4 M.-%/z zu einer deutlich höheren Wasseraufnahme aus der Luft, mit einem entsprechend steilem Gradienten. Zwischen einer relativen Luftfeuchte von 85 % und 95 % steigt die Wassersättigung

sprunghaft an, sodass die Adsorptionskurve die Desorptionskurve des chloridfreien Betons kreuzt. Insgesamt zeigt sich die Hysterese zwischen Desorption und Adsorption bei einem Chloridgehalt von 4 M.-%/z weniger ausgeprägt als bei chloridfreien Betonen. Der Verlauf der Sorptionsisotherme für hohe Chloridgehalte mit der wenig ausgeprägten Hysterese und dem sprunghaften Wasseranstieg zeigt sich in vergleichbarer Weise auch für den CEM III-Beton, vgl. Abbildung 6-7 und kann entsprechend als charakteristisch bezeichnet werden.

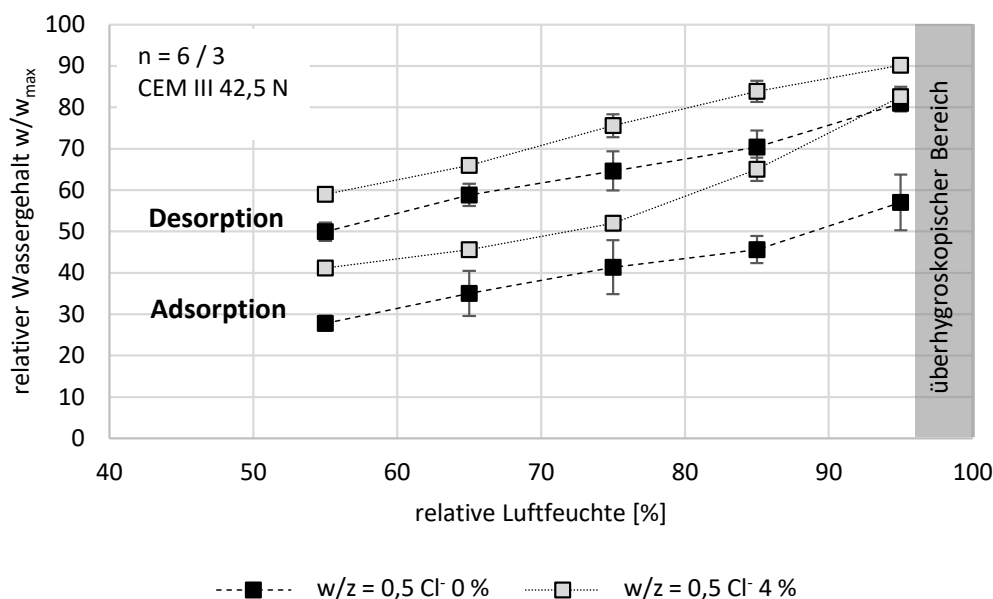


Abbildung 6-7: Sorptionsisotherme CEM III,  $w/z = 0,5$  bei 0 M.-% Cl-/z und 4 M.-% Cl-/z

#### 6.2.4 Zusammenfassung Sorptionsisotherme

Die ermittelten Ergebnisse zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Sorptionsisotherme an chloridfreien Betonen sowie die ermittelten Hystereseeffekte zeigen eine gute Übereinstimmung mit bereits veröffentlichten Ergebnissen [159–161] und werden auch durch vereinfachte mathematische Formulierungen wie der Kelvin-Thomson-Beziehung, vgl. Gleichung 4.1, nachvollzogen.

Die Betrachtung der Sorptionsisotherme von chloridbelastetem Beton zeigt, dass die Austrocknung moderat chloridbelasteter (NaCl) Betone bis 2 M.-%/z über die Zeit ähnlich abläuft wie die Austrocknung eines chloridfreien Betons gleicher Betonzusammensetzung. Durch die Dampfdruckerniedrigung in den Poren der chloridhaltigen Probekörper liegt der Grad der Wassersättigung leicht über dem der chloridfreien Proben. Der sogenannte Deliqueszenzpunkt, der bei Überschreiten zu einer vollständigen Sättigung des Porenraums führt, liegt für den zugrundeliegenden Chloridgehalt von 2 M.-%/z und der damit verbundenen Anzahl an  $\text{Na}^+$ -Ionen für die untersuchten Betone bei einer relativen Luftfeuchte  $> 95\%$  und damit im überhygroscopischen Bereich des Betons. Die festgestellte Hysterese zwischen

Adsorption und Desorption deutet darauf hin, dass die Wiederaufnahme der Feuchtigkeit aus der Luft deutlich verringert stattfindet und die Gleichgewichtsfeuchten aus der Desorption nicht erreicht werden.

Höhere Chloridgehalte wie die untersuchten 4 M.-%/z verschieben die Deliqueszenzfeuchte hin zu niedrigeren Luftfeuchten. Entsprechend konnte bei den Untersuchungen festgestellt werden, dass der belastete Beton erst ab Luftfeuchten von 85 % r. F. signifikant austrocknet. Zuvor wird das Wasser, aufgrund des Bestrebens des Salzes, eine Kristallbildung zu verhindern, im Probekörper gehalten. Die Wassermoleküle besitzen nicht genug Energie, um die Bindungsenergie zu überwinden und verbleiben an der Porenwand. Bei der Adsorption konnte ab einer relativen Feuchte von 85 % ein sprunghafter Anstieg der Wasseraufnahme aus der Luft festgestellt werden.

Für das Instandsetzungsverfahren 8.3 lassen sich aus den ermittelten Ergebnissen der Sorptionsisotherme folgende Erkenntnisse ableiten:

- Das Bindemittel des Betons sowie der Wasserzementgehalt haben einen Einfluss auf die Austrocknung des Betons. Hüttensandhaltiger Beton und Beton mit geringem w/z-Wert trocknen in der Umgebungsluft in geringerem Maße aus als vergleichbarer Beton mit Portlandzement oder höheren w/z-Werten.
- Zwischen Desorption und Adsorption ergibt sich eine deutliche Hysterese. Die Gleichgewichtsfeuchte bei der Wasseraufnahme aus der Luft liegt deutlich unter der Gleichgewichtsfeuchte bei der Wasserabgabe des Betons.
- Moderat chloridbelasteter Beton bis 2 M.-%/z zeigt ein annähernd gleiches Austrocknungsverhalten wie chloridfreier Beton. Auch die Hysterese ist in einem vergleichbaren Ausmaß feststellbar.
- Ein hoher Chloridgehalt im Beton verschiebt den Deliqueszenzpunkt in den Bereich relevanter baupraktischer Luftfeuchten. Eine Austrocknung wird entsprechend verhindert und die Wiederaufnahme der Feuchtigkeit aus der Luft erfolgt in Abhängigkeit des Chloridgehalts in den Bereichen 95 % r. F bis 75 % r. F. sprunghaft.

Die Ergebnisse der Sorptionsisotherme zeigen, dass es für Beton mit Chloridgehalten bis 2 M.-%/z möglich ist, in trockener Umgebungsfeuchte eine baupraktische Begrenzung des Wassergehalts zu erreichen. Die Einflüsse dieser Austrocknung auf den spezifischen Elektrolytwiderstand sowie auf die Korrosionsstromdichte werden in den nächsten Abschnitten dieser Arbeit untersucht.

## 6.3 Zeitliche Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands

### 6.3.1 Allgemeines

Der Einfluss der Austrocknung auf die Dauerhaftigkeit des Stahlbetons lässt sich nur indirekt durch die Messung der Korrosionsparameter bewerten. Die Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände könnte dabei für die Wirksamkeit des Verfahrens 8.3 eine entscheidende Kenngröße darstellen. Entsprechend wurde der Elektrolytwiderstand über die Austrocknung an unterschiedlichen Probekörpern über die Zeit erfasst.

Um den Einfluss der fortlaufenden Hydratation bei der Widerstandsmessung zu reduzieren, erfolgten die Messungen des Elektrolytwiderstands über die Austrocknung erst ab einem Probekörperalter von 91 Tagen. Zur größtmöglichen Einordnung des ermittelten spezifischen Elektrolytwiderstands nach 91 Tagen wurden die Ergebnisse mit den 28 Tage-Werten von Osterminski [94] verglichen, vgl. Abbildung 6-8.

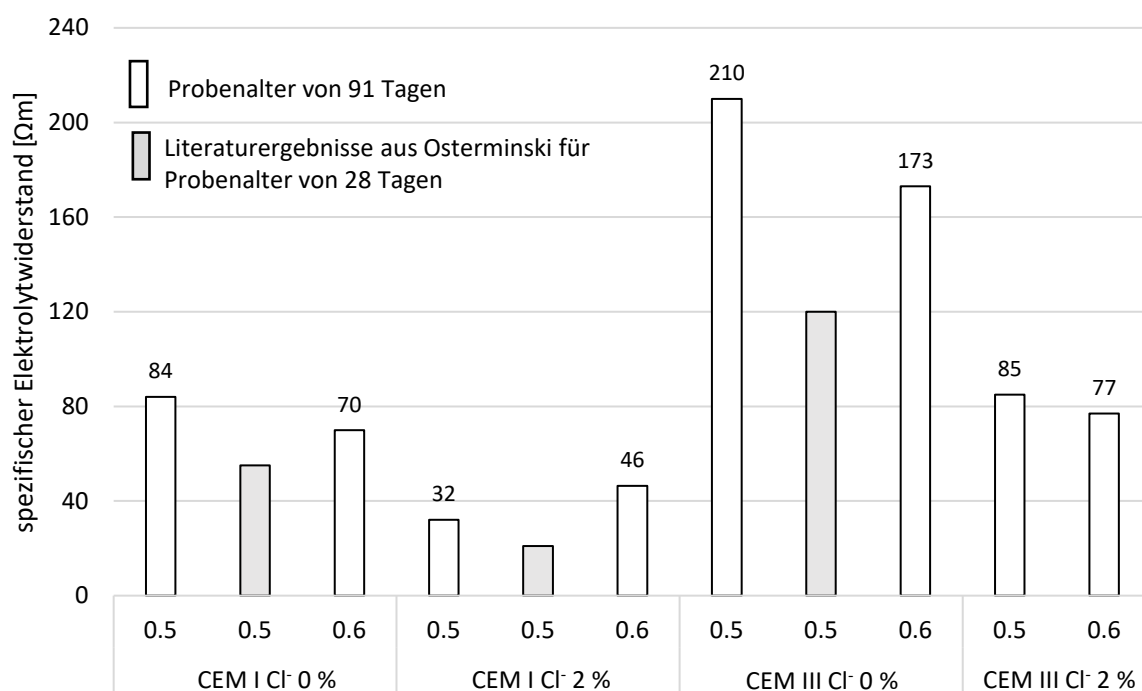


Abbildung 6-8: Spezifische Elektrolytwiderstände der Betone aus Tabelle 5.2 nach 91 Tagen und Wassersättigung der Probekörper. Graue Balken: Ergebnisse nach 28 Tagen aus [94]

Die Ergebnisse zeigen, dass die Alterung erwartungsgemäß zu einer Erhöhung des spezifischen Elektrolytwiderstands gegenüber den 28 Tage-Werten aus Untersuchungen von Osterminski [94] führt. Unter der Vernachlässigung zementspezifischer Faktoren wie Produktcharge und Produkthersteller ergibt sich

überschlägig eine faktorielle Alterung von 1,5 für den CEM I Beton und 1,8 für den CEM III Beton.

Der Einfluss des Bindemittels auf den spezifischen Elektrolytwiderstand deckt sich mit Untersuchungsergebnissen von [13; 87; 162; 163]. Im Weiteren werden die Elektrolytwiderstandswerte als Ausgangswerte und als Bezugsgröße für die Änderung des Elektrolytwiderstands über die Austrocknung herangezogen. Ein weiterer Einfluss der Hydratation über die Messdauer bleibt unberücksichtigt. Im Besonderen für den CEM III Beton kann dies zu einer Unterschätzung des Alterungseffektes und eine Überschätzung des Trocknungseffekts führen. Für Modellrechnungen ist es entsprechend sinnvoll, die Ansätze mittels Altersexponenten z. B. aus Osterminski [94] zu extrapolieren, vgl. Abschnitt 7.4.

### 6.3.2 Spezifischer Elektrolytwiderstand bei Feuchtedesorption des Betons

Im Rahmen der Untersuchungen wurden an den in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen, unbeschichteten Flachprismen („W-Cl-Single“) zur Bestimmung der Sorptionsisothermen auch die spezifischen Elektrolytwiderstände erfasst, sodass die Korrelation zwischen dem sich während der Austrocknung des Betons einstellenden Wassergehalts und dem spezifischen elektrolytischen Widerstand ermittelt werden kann. Exemplarisch zeigt Abbildung 6-9 die spezifischen Widerstände mit den erfassten Streubreiten eines Betons CEM I 42,5 N, w/z 0,5, 0 M.-% Cl<sup>-</sup>/z links und eines Betons CEM III 42,5 N, w/z 0,5, 0 M.-% Cl<sup>-</sup>/z rechts bei den jeweiligen Ausgleichsfeuchten bei konstanter Luftfeuchte. Im Diagramm wurde der Bereich von 1.000 Ωm gekennzeichnet, der gemäß Abschnitt 4.3.3 häufig als unterer Schwellenwert eines feststellbaren Einflusses auf die Korrosionsstromdichte angegeben ist.

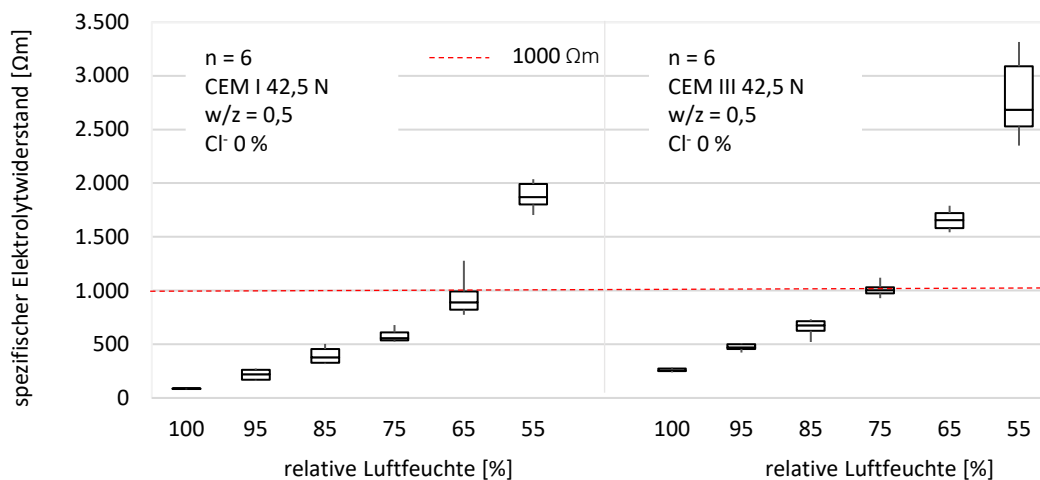


Abbildung 6-9: Ergebnisse der Messung des spezifischen Widerstands bei der Desorption mit CEM I (links) und CEM III (rechts), w/z = 0,5 und 0 M.-% Cl<sup>-</sup>/z



Die Ergebnisse der Bestimmung des spezifischen Widerstands zeigen sowohl für den CEM I-Beton als auch für den CEM III-Beton eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen aus der Literatur. In Abbildung 6-10 wird hierfür der faktorielle Einfluss der Luftfeuchte auf den Elektrolytwiderstand mit Ergebnissen von [94] und [164] verglichen. Hierfür wird der Widerstand bei der jeweils untersuchten Luftfeuchte auf den Widerstand bei der Sättigung bezogen.

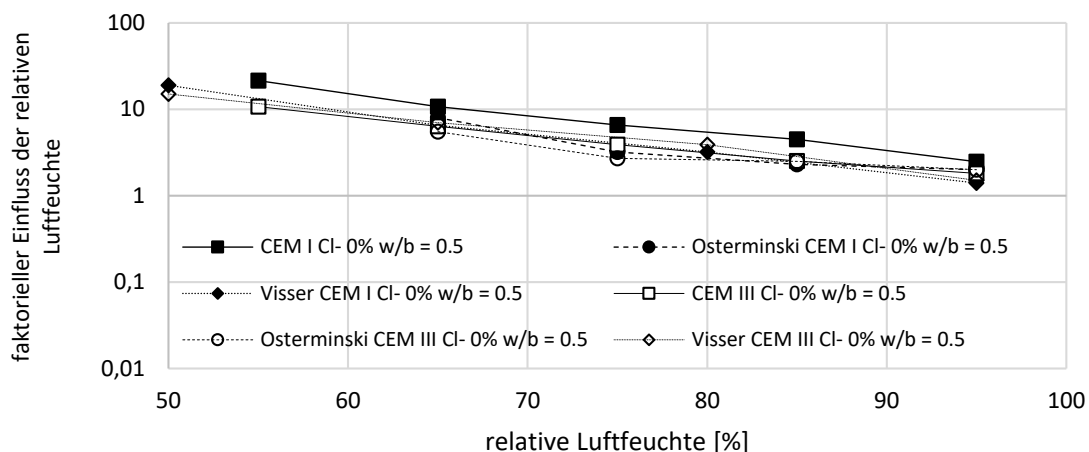


Abbildung 6-10: Einfluss der Luftfeuchte auf den spezifischen Elektrolytwiderstand der untersuchten Betone mit einem Vergleich aus Osterminski [94] und Visser [164]

Aus den Ergebnissen des spezifischen Widerstands bei den untersuchten Feuchtegehalten lässt sich eine Korrelation zwischen ermitteltem Wassergehalt und spezifischen Widerständen ableiten, vgl. Abbildung 6-11.

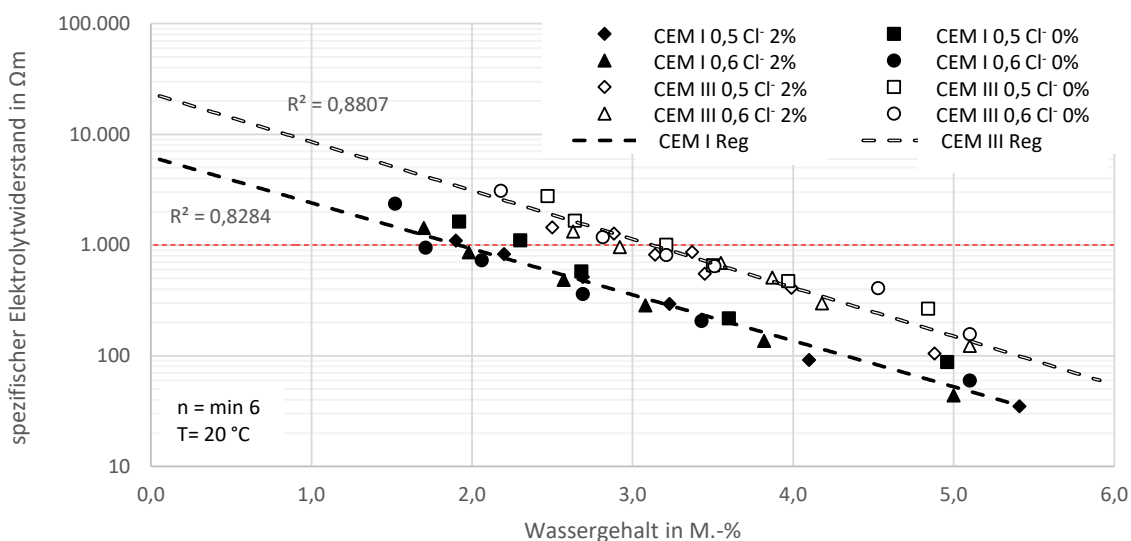


Abbildung 6-11: Korrelation zwischen spezifischem Elektrolytwiderstand und dem ermittelten Wassergehalt des Betons

Zum Überschreiten des Schwellenwerts von  $1000 \Omega\text{m}$  muss der Wassergehalt bei Verwendung eines CEM I-Betons unter einen Wert von 2 M.-% sinken. Bei Verwendung eines CEM III-Betons ist ein Wassergehalt unter 3 M.-% anzustreben, um den beschriebenen Schwellenwert zu erreichen. Nachdem der Beton über die Zeit weiter hydratisiert und damit auch der spezifische Elektrolytwiderstand steigt, kann der dargestellte Zusammenhang für Betone in einem Alter zwischen 90 und 360 Tagen zugrunde gelegt werden. Für ältere Betone verliert die Abbildung 6-11 aufgrund der fortschreitenden Hydratation und Alterung des Betons ihre Aussagekraft.

In Abhängigkeit von der Zementart und der sich bei der Sorption einstellenden Bauteilfeuchte lässt sich auch der Einfluss des Chloridgehalts auf die Leitfähigkeit und damit auf den Elektrolytwiderstand abbilden, vgl. Abbildung 6-12. Die hier dargestellte faktorielle Größe des spezifischen Elektrolytwiderstands ergibt sich aus dem Verhältniswert des jeweiligen spezifischen Elektrolytwiderstands eines Betons ohne Chlorid und eines Betons mit definiertem Chloridgehalt. Hier für einen Bereich der Luftfeuchte von 75 % r. F. angegeben. Mit abnehmender Luftfeuchte nimmt die Bedeutung der Ionenleitfähigkeit zu.

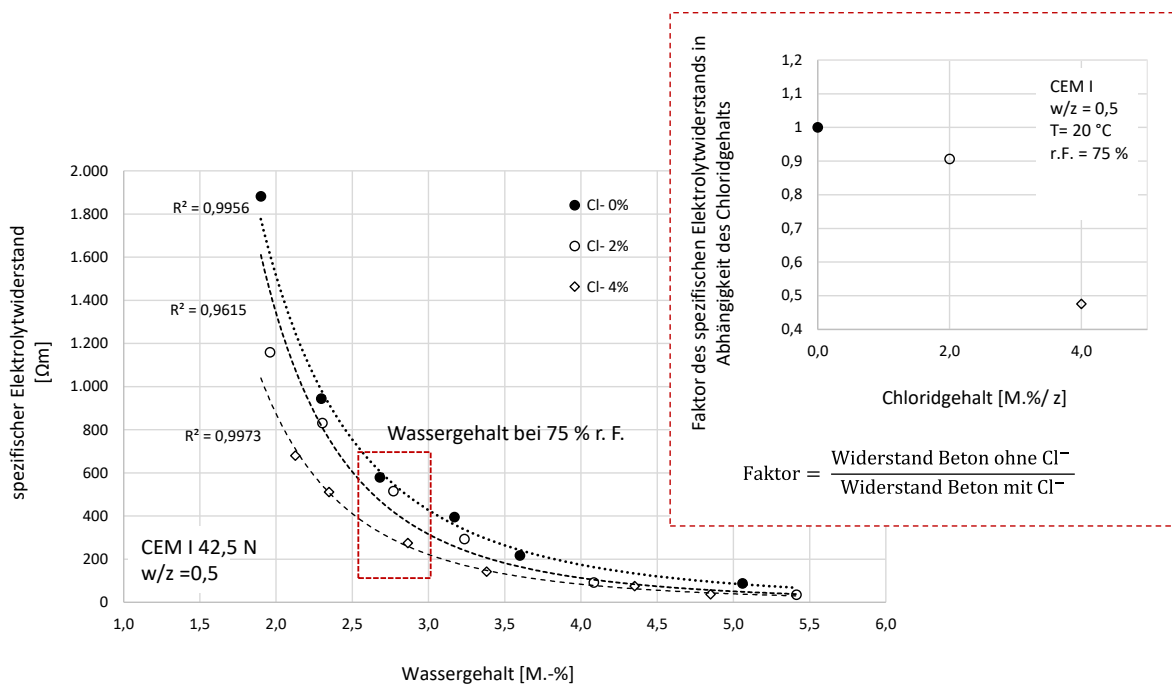


Abbildung 6-12: Einfluss des Chloridgehalts bei CEM I-Beton auf den spezifischen Elektrolytwiderstand (links) und faktorielle Darstellung des Einflusses des Chloridgehalts bei 75 % r. F. (rechts)

Im Rahmen der Untersuchungen können dem Einfluss des Chloridgehalts zwei maßgebliche Effekte auf den spezifischen Elektrolytwiderstand zugeordnet werden. Aufgrund der Dampfdruckerniedrigung und der Verschiebung der Deliqueszenzfeuchte im chloridbelasteten Beton ergeben sich höhere Wassergehalte für die jeweilige Ausgleichsfeuchte. Dies führt bei den entsprechenden Lagerungsfeuchten zu geringeren spezifischen Widerständen. Zusätzlich ergibt sich ein Effekt durch die Ionenleitfähigkeit der Chloridionen. Im Bereich hoher Luftfeuchten wird dieser Effekt durch den Porenfüllgrad überlagert und zeigt sich entsprechend weniger ausgeprägt. Für niedrige Luftfeuchten und bei hohen Chloridgehalten zeigt sich die Auswirkung der Ionenleitfähigkeit deutlich ausgeprägter und führt auch bei sehr geringen Luftfeuchten gerade bei hoch chloridbelasteten Betonen (> 2 M.-%/z) zu einer hohen Leitfähigkeit.

### 6.3.3 Spezifischer Elektrolytwiderstand bei Feuchteadsorption des Betons

Der spezifische Widerstand bei der Feuchteaufnahme aus der Luft, also bei Adsorption, ist ein weiterer Untersuchungsparameter, der analog zur Bestimmung des spezifischen Widerstands bei Desorption an den Flachprismen „W-Cl-Single“ ermittelt wurde. Abbildung 6-13 zeigt exemplarisch den Verlauf des spezifischen Widerstands für einen Beton CEM I 42,5 N, w/z 0,5, 0 M.-% Cl/z links und für einen Beton CEM III 42,5 N, w/z 0,5, 0 M.-% Cl/z rechts bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte aus einem Trockenzustand heraus.

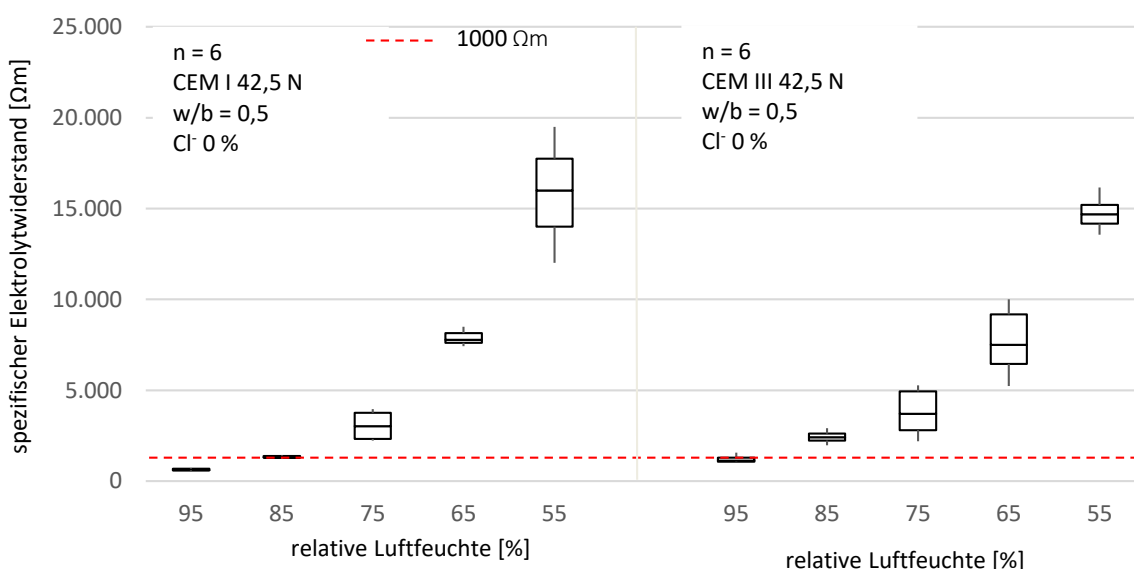


Abbildung 6-13: Ergebnisse der Messung des spezifischen Widerstands bei der Adsorption mit CEM I (links) und CEM III (rechts), w/z = 0,5 und 0 M.-% Cl/z

Der chloridfreie Beton zeigt bei Adsorption deutlich höhere spezifische Widerstände als bei Desorption. Selbst bei sehr hohen Luftfeuchten von 85 % r. F. liegen die spezifischen Widerstände für die untersuchten Betone oberhalb von 1.000 Ωm.

Anders stellt sich dies für die chloridhaltigen Betone dar. Die Ergebnisse aus Abbildung 6-14 zeigen, dass mit zunehmendem Chloridgehalt und zunehmender Luftfeuchte der spezifische Elektrolytwiderstand deutlich abnimmt. So liegt der CEM I - Beton mit 2 M.-% Cl/z bei 75 % r. F. bei einem spezifischen Elektrolytwiderstand von rd. 1.000 Ωm.

Noch deutlicher wird die hygroskopische Wirkung des NaCl bei den stark belasteten Proben mit 4 M.-% Cl/z. Hier unterschreitet der spezifische Widerstand bereits bei 65 % r. F. den Schwellenwert von 1.000 Ωm.

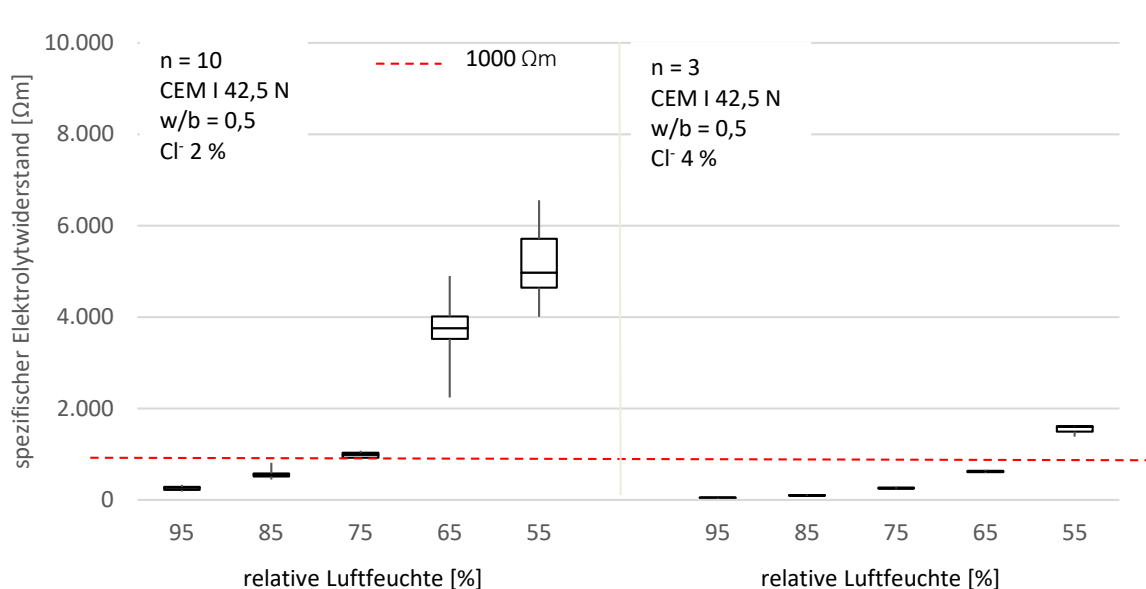


Abbildung 6-14: Ergebnisse der Messung des spezifischen Widerstands bei der Adsorption für einen CEM I Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 mit 2 M.-% Cl⁻/z (links) und 4 M.-% Cl⁻/z (rechts)

Die Ergebnisse des spezifischen Widerstands bei Adsorption zeigen einen für das Verfahren 8.3 interessanten Aspekt, der sich aus der Hysterese der Sorptionsisotherme ableitet und durch die Messungen der Widerstände belegt wird. Im Vergleich zur Austrocknung verbleiben die spezifischen Elektrolytwiderstände bei der Wiederbefeuchtung auf einem deutlichen höheren Niveau.

Das gilt auch für den untersuchten moderat chloridbelasteten Beton mit 2 M.-% Cl⁻/z. Hier liegen die spezifischen Elektrolytwiderstände bei der Wasserdampfaufnahme auch bei hohen relativen Luftfeuchten > 75 % r. F. noch um den Faktor 2 höher als bei Wasserdampfabgabe, vgl. Abbildung 6-15. Bei hohen Chloridgehalten (hier 4 M.-%/z) und niedrigen Wassergehalten (55 % r. F.) kann dieser Effekt ebenfalls beobachtet werden. Mit zunehmendem Wassergehalt reduziert sich dieser Effekt und ab Luftfeuchten von rd. 85 % r. F. kippt der Effekt und führt bei Adsorption zu niedrigeren spezifischen Widerständen als bei Desorption.

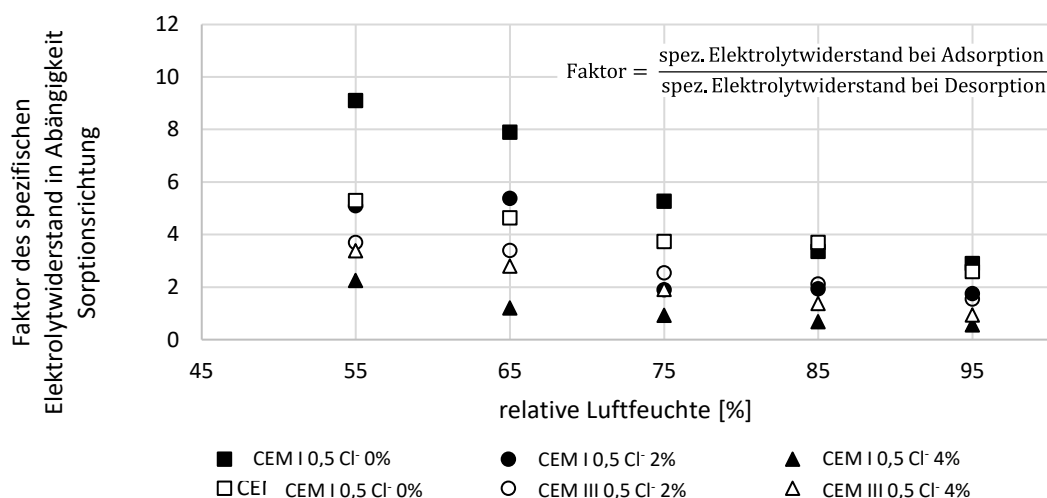


Abbildung 6-15: Faktorielle Darstellung des Hysterese-Einflusses auf den spezifischen Elektrolytwiderstand

### 6.3.4 Zeitliche Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands bei beschichteten Stahlbetonproben und trockener Umgebung

Bei der Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 sollen die chloridbelasteten Stahlbetonbauteile auch unter einer Beschichtung austrocknen, bis sich ein möglichst hoher spezifischer Elektrolytwiderstand einstellt. Für das Austrocknungsverhalten von beschichtetem Beton werden die in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Probekörper „W-Cl-Multi“ für 90 Tage in einem Klima von 20 °C und 98 % r. F. konditioniert und anschließend für eine Zeit von rd. 12 Monaten in einem Klima von 22 °C und 55 ± 2 % r. F. gelagert. Um den Einfluss des Oberflächenschutzsystems bestimmen zu können, wurden parallel zu den beschichteten Proben Referenzproben ohne Beschichtung sowohl im trockenen Klima als auch in einem kontinuierlich feuchten Klima (20 °C; 98 % r. F.) untersucht. Über die Zeit wurden die Elektrolytwiderstände des Betons tiefengestaffelt erfasst und ausgewertet. Exemplarisch für die Messungen zeigt Abbildung 6-16 die Ergebnisse der tiefengestaffelten Elektrolytwiderstandsbestimmung für die unbeschichteten Referenzproben eines CEM I-Betons mit einem w/z-Wert von 0,5 und einem Chloridgehalt von 2,0 M.-%/z.

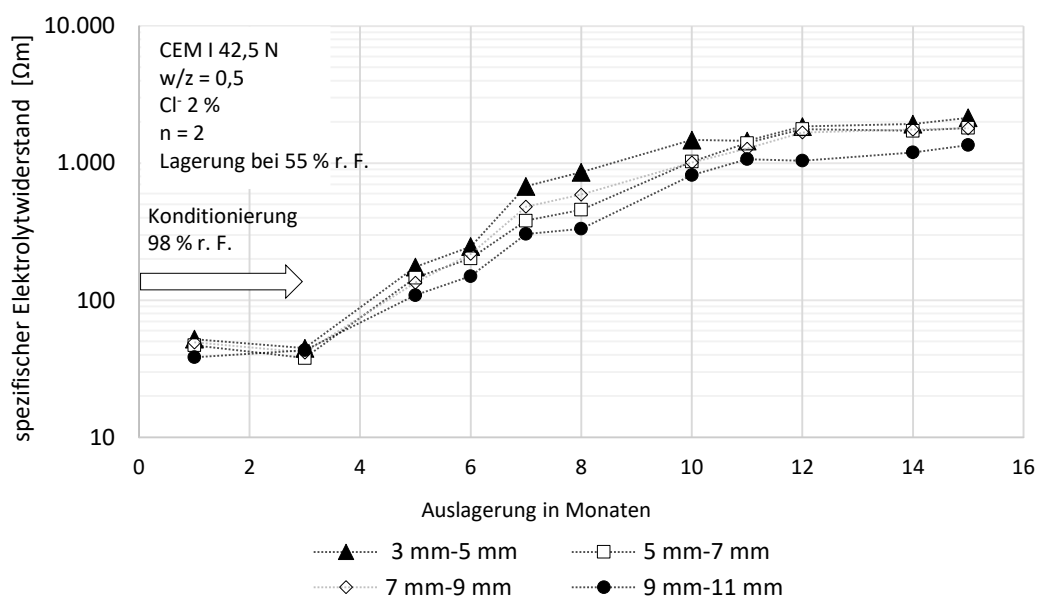


Abbildung 6-16: Entwicklung des tiefengestaffelten Elektrolytwiderstands über die Auslagerungsdauer der unbeschichteten Referenzproben CEM I, w/z = 0,5 und Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z

Der Messwerteverlauf zeigt über die ersten drei Monate bei einer Konditionierung von 98 % r. F. spezifische Widerstände von rd. 40 Ωm. Mit Beginn der Lagerung im trockenen Laborklima steigen die spezifischen Elektrolytwiderstände in allen Tiefenlagen kontinuierlich an. Über die unterschiedlichen Tiefenlagen lässt sich der Feuchtegradient der Austrocknung erkennen. Nach acht Monaten Austrocknung gleichen sich die spezifischen Widerstände bis in eine Tiefenlage von 9 mm an. Die Tiefenlage bis 11 mm zeigt bis zum Ende der Auslagerung nach zwölf Monaten Trocknung mit einem spezifischen Widerstandswert von 1.355 Ωm den niedrigsten spezifischen Widerstandswert. Unter Berücksichtigung einer geringfügigen Carbonatisierung und einer entsprechenden Auswirkung auf die Isolinien des Betons korrelieren die Ergebnisse des spezifischen Widerstands an den Probekörpern „W-Cl-Multi“ gut mit den spezifischen Widerständen für die Ausgleichsfeuchten bei den Probekörpern der Serie „W-Cl-Single“, vgl. Abbildung 6-17. Die unterschiedlichen spezifischen Widerstände lassen sich mit der fortschreitenden Hydratation des Zements begründen [94; 164].

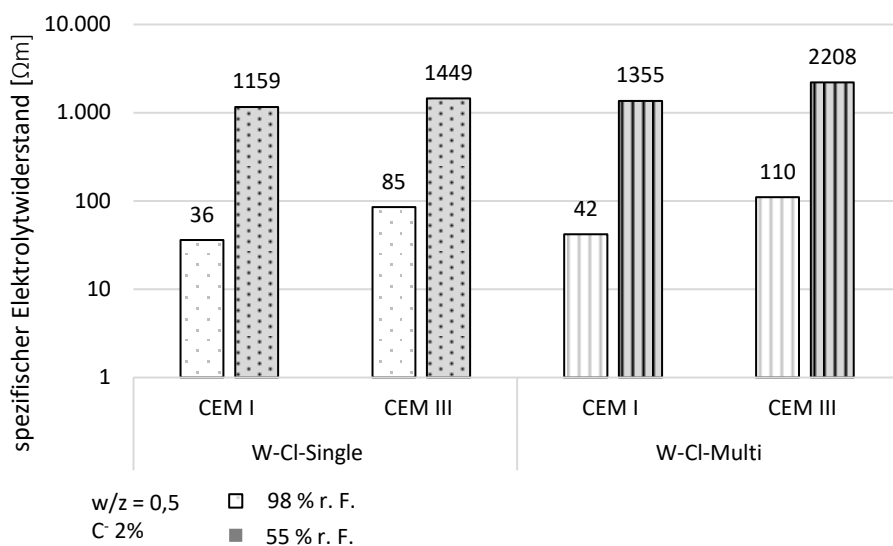


Abbildung 6-17: Vergleich der spezifischen Elektrolytwiderstände „W-Cl-Single“ und „W-Cl-Multi“ der unbeschichteten Referenzproben CEM I und CEM III, w/z = 0,5 und Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z bei Ausgleichsfeuchte

Für die weitere Auswertung und Darstellung wurden die Ergebnisse der einzelnen Tiefenlagen statistisch zusammengefasst und bilden damit die Entwicklung des spezifischen Widerstands bis in eine Tiefe von 10 mm ab. Abbildung 6-18 zeigt exemplarisch die Entwicklung der spezifischen Widerstände für einen CEM I-Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 und einem Chloridgehalt von 2,0 M.-%/z. Der zitierte Schwellenwert von 1.000 Ωm wird im Diagramm durch eine gestrichelte Linie markiert. Die Abbildung wurde in [156] veröffentlicht.

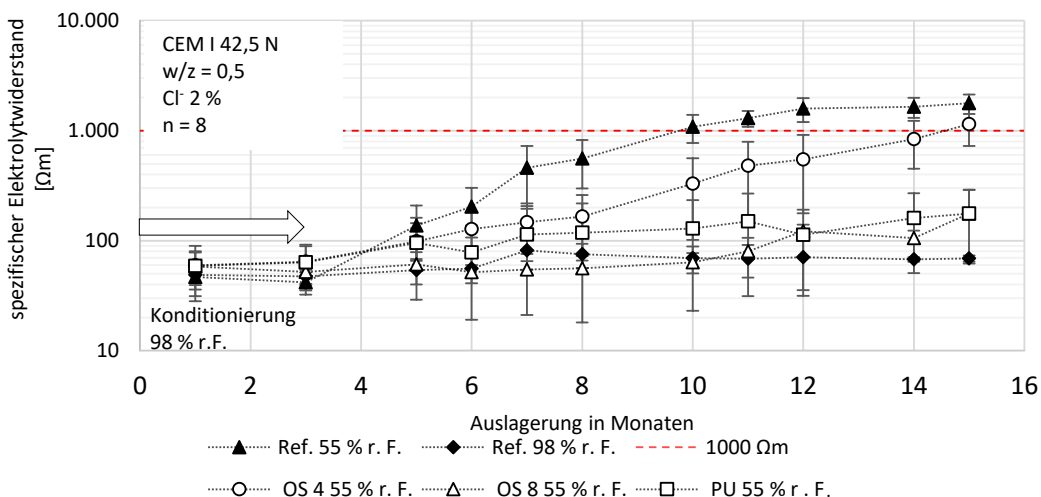


Abbildung 6-18: Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM I, w/z = 0,50, 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte



Die Ergebnisse zeigen für die Prüfkörper ohne Beschichtung bei Lagerung in feuchtem Klima (98 % r. F.) über die Zeit annähernd konstante Elektrolytwiderstände. Die Zunahme des Widerstands über die Auslagerung im feuchten Klima kann mit einem Alterungsfaktor von 1,4 angegeben werden und liegt damit im unteren Bereich des Konfidenzintervalls, welches Osterminski [94] für die Abhängigkeit des spezifischen Elektrolytwiderstands für wassergelagerte Proben über die Zeit angibt, vgl. hierzu Abbildung 4-7 aus Abschnitt 4.3.2.

Die Elektrolytwiderstände der Probekörper ohne Beschichtung erhöhen sich über die Trockenlagerung in den ersten zehn Monaten kontinuierlich um den Faktor 40 gegenüber dem Ausgangswiderstand auf zuletzt rd. 1.700  $\Omega\text{m}$ . Die Elektrolytwiderstände der beschichteten Probekörper bei Trockenlagerung liegen bei zunehmender Auslagerungsdauer innerhalb der Spannbreite der unbeschichteten Probekörper in Trockenlagerung und denen der unbeschichteten Probekörper in Feuchtlagerung. Dabei zeigen die Probekörper mit einer diffusionsoffenen OS 4-Beschichtung Elektrolytwiderstände, die sich zum Ende des Untersuchungszeitraums denen der unbeschichteten Probekörper bei Trockenlagerung annähern. Dagegen verharren die Elektrolytwiderstände der Probekörper mit OS 8-Beschichtung und der PU-Schwimmschicht über den gesamten Untersuchungszeitraum auf einem niedrigen Niveau. Eine signifikante Austrocknung kann bei den stark diffusionsbremsenden Beschichtungssystemen erwartungsgemäß nicht festgestellt werden.

Die Entwicklung des spezifischen Widerstands und das damit verbundene Austrocknungsverhalten für einen vergleichbaren CEM III-Beton mit den entsprechenden Oberflächenschutzsystemen sowie unter den Referenzbedingungen ergibt sich aus Abbildung 6-19.

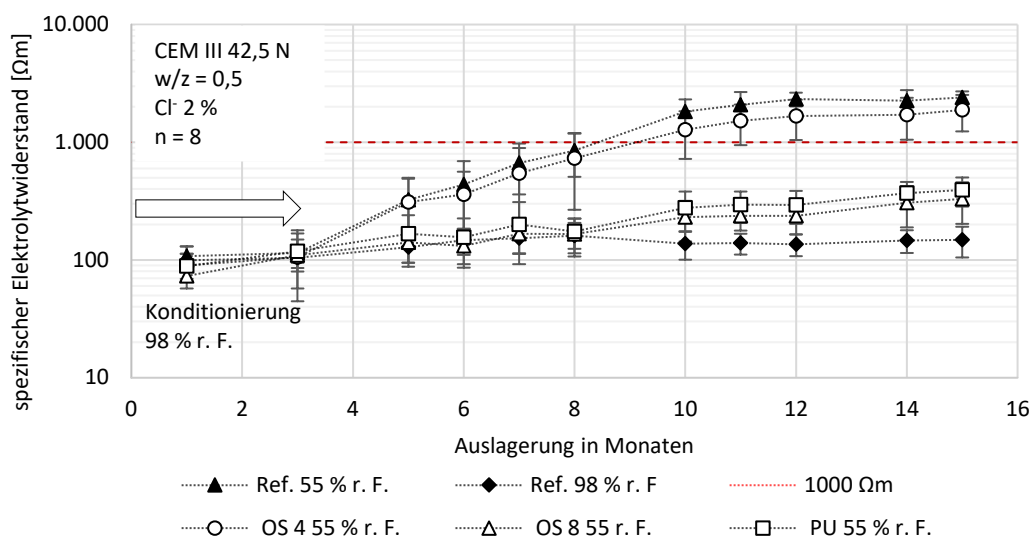


Abbildung 6-19: Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM III, w/z = 0,50, 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte

Die Ergebnisse zeigen für den CEM III-Beton mit einem Chloridgehalt von 2 M.-%/z sowohl für den Referenzbeton als auch für die diffusionsoffene Beschichtung einen deutlichen Anstieg des spezifischen Elektrolytwiderstands infolge einer Austrocknung um einen Faktor von rd. 30 für den unbeschichteten Beton und einen Faktor von 28 für den Beton mit einer OS 4-Beschichtung. Insgesamt verläuft der Gradient der Austrocknung flacher als bei dem vergleichbaren CEM I-Beton, was sich gut in Einklang mit den Ergebnissen aus den Sorptionsisothermen bringen lässt. Unterhalb der stark diffusionsbremsenden Beschichtungen ist, wie auch schon bei den CEM I Betonen, keine signifikante Austrocknung erkennbar. Der Anstieg des Elektrolytwiderstands bewegt sich unter der Berücksichtigung der Alterung des Betons im Bereich von 200  $\Omega\text{m}$  bis 300  $\Omega\text{m}$ . Anhand der unbeschichteten Referenzproben bei feuchten Lagerungsbedingungen kann für den CEM III-Beton ein Alterungseffekt um den Faktor 2 festgestellt werden, der vergleichbar mit dem CEM III-Beton im unteren Bereich des Erwartungsintervalls von Osterminski [94] liegt.

Zusammengefasst zeigt Abbildung 6-20 die Ergebnisse der zeitlichen Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände für alle untersuchten Parameter (Betonzusammensetzungen, Chloridgehalte) jeweils zu Beginn der Auslagerung im Laborklima (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d).

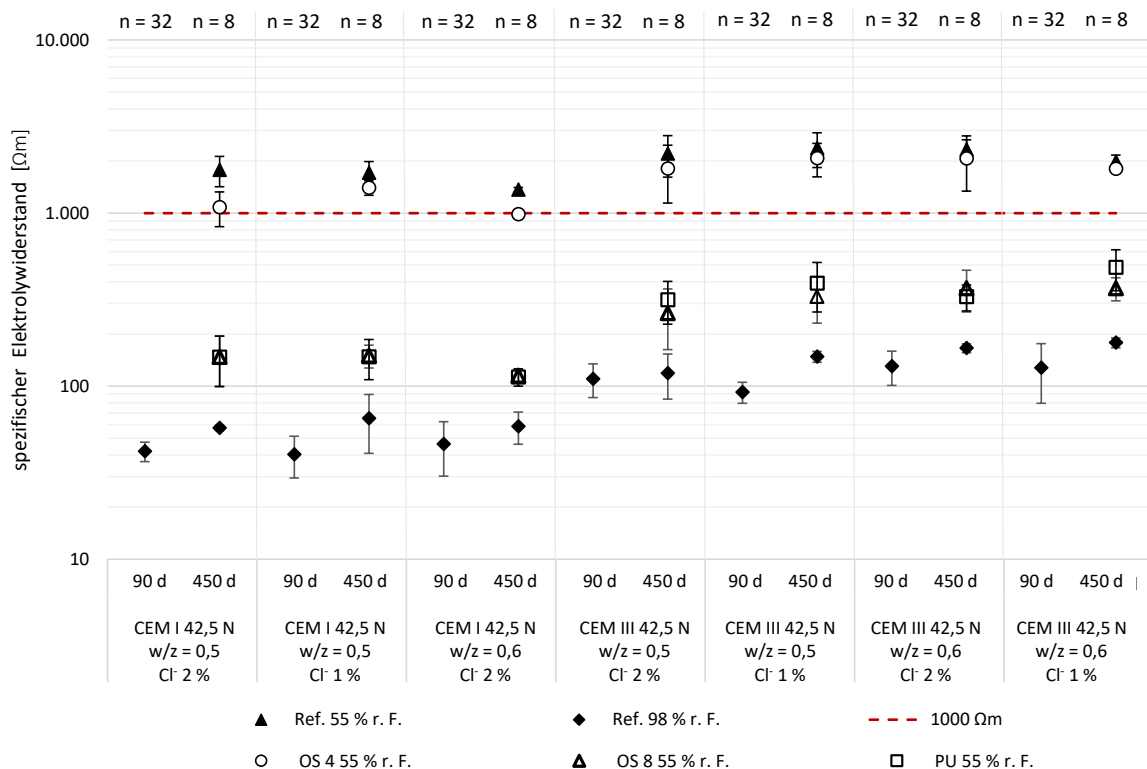


Abbildung 6-20: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände zu Beginn der Auslagerung im Laborklima nach Feuchtelagerung (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte

Bei den Referenzprüfkörpern in Feuchtelagerung kann man gut den Einfluss der Zementart auf den Elektrolytwiderstand und gerade bei den CEM III-Betonen die Zunahme der Elektrolytwiderstände über den Auslagerungszeitraum durch die späte latent-hydraulische Reaktion erkennen. Bei der Trockenlagerung (Auslagerung bei 55 % r. F.) erreichen die unbeschichteten Probekörper (Referenzbetone) sowie die Proben mit den diffusionsoffenen Beschichtungen nach einem Jahr Werte über 1 k $\Omega$ m. Für die OS 8-Beschichtung und die PU-Dichtungsschicht kann eine derartig starke Austrocknung bei keinem untersuchten Beton und bei keiner Chloridbelastung erreicht werden. Die Steigerung der spezifischen Elektrolytwiderstände, ausgehend von Beginn der Trockenlagerung, liegt in einem Bereich von Faktor 3 bis Faktor 5, die maximalen Widerstände bleiben für einen CEM III-Beton, w/z = 0,5, 1 M.-% Cl/z mit 550  $\Omega$ m jedoch deutlich unter 1 k $\Omega$ m.

Wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, werden in der Literatur die Passivstromdichten häufig mit einem spezifischen Elektrolytwiderstand von  $\geq 10$  k $\Omega$ m korreliert. Über den Untersuchungszeitraum wurden diese spezifischen Elektrolytwiderstände bei keinem Prüfkörper erreicht.

### **6.3.5 Zusammenfassung zur Untersuchung des spezifischen Elektrolytwiderstands**

Die im Rahmen der Arbeit ermittelten Ergebnisse zeigen wie erwartet eine deutliche Korrelation zwischen Wassergehalt und dem spezifischen Elektrolytwiderstand des Betons. Diese Korrelation zeigt sich auch bei chloridbelasteten Betonen. Die höhere Leitfähigkeit des chloridbelasteten Betons resultiert in Abhängigkeit vom Chloridgehalt aus einer dem Raoult'schem Gesetz folgenden Dampfdruckerniedrigung in den Poren, vgl. Abschnitt 4.2.3, sowie aus der höheren Ionenleitfähigkeit der Porenflüssigkeit. Über die Austrocknung erreicht auch der moderat chloridbelastete Beton bei sehr trockenen Laborbedingungen einen spezifischen Elektrolytwiderstand  $> 1$  k $\Omega$ m, der in der Literatur als unterer Grenzwert für eine hinreichende Hemmung der Korrosionsraten genannt wird. Widerstandswerte im Bereich  $> 10$  k $\Omega$ m konnten im Bereich der Desorption bis zu einer relativen Luftfeuchte von 55 % r. F. nicht festgestellt werden und ergeben sich in Abhängigkeit von der Zementart erst bei deutlich niedrigeren Luftfeuchten und entsprechend niedrigen Ausgleichsfeuchten im Beton oder durch die Carbonatisierung des Betons, vgl. hierzu Ergebnisse von Weydert [133].

In Abhängigkeit vom applizierten Oberflächenschutzsystem wird die Austrocknung des Betons gegenüber einem unbeschichteten Beton gebremst. Ein sehr günstiges Austrocknungsverhalten kann für die diffusionsoffene OS 4-Beschichtung festgestellt werden. Das Austrocknungsverhalten zeigt sich im Vergleich zur trockenen Referenzprobe verzögert, dennoch führt die Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands nach einer Auslagerung von 450 Tagen in sehr trockenem Klima zu spezifischen Widerständen im Bereich von 1 k $\Omega$ m.

Die stark diffusionsbremsenden Beschichtungen (OS 8 und PUR) zeigen auch bei den sehr trockenen Umgebungsbedingungen nur ein begrenztes Austrocknungsverhalten. Die spezifischen Elektrolytwiderstände steigen über die Auslagerung an, erreichen aber bei keiner untersuchten Randbedingung den Bereich von 1 k $\Omega$ m.

Für das Instandsetzungsverfahren 8.3 lassen sich aus den ermittelten Ergebnissen der spezifischen Elektrolytwiderstände folgende Erkenntnisse ableiten:

- Unter trockenen Bedingungen erreichen auch moderat chloridbelastete, unbeschichtete Probekörper hohe spezifische Elektrolytwiderstände > 1 k $\Omega$ m.
- Das Bindemittel des Betons hat einen Einfluss auf den spezifischen Elektrolytwiderstand des Betons. So erreicht der hüttensandhaltige Beton einen höheren spezifischen Widerstand als vergleichbare Betone mit einem Portlandzement als Bindemittel.
- Für diffusionsoffene Oberflächenschutzsysteme (OS 4) zeigt sich ein verzögertes, aber dennoch günstiges Austrocknungsverhalten.
- Stark diffusionsbremsende Oberflächenschutzsysteme (OS 8, PUR) verzögern die Austrocknung so stark, dass innerhalb der Austrocknungszeitraums von 12 Monaten hohe spezifische Elektrolytwiderstände > 1 k $\Omega$ m nicht erreicht wurden.
- Die Feuchtehysterese zwischen Adsorption und Desorption wirkt sich gerade bei geringen Luftfeuchten sehr stark auf den spezifischen Elektrolytwiderstand aus. Mit Erreichen der Ausgleichsfeuchte liegen die spezifischen Elektrolytwiderstände bei Adsorption deutlich über den Werten bei Desorption.

## 6.4 Zeitliche Entwicklung der Korrosionsparameter bei Austrocknung von beschichtetem Beton

### 6.4.1 Allgemeines

Die Beschreibung der Korrosionskinetik erfolgte durch die regelmäßige Ermittlung der Elementstromdichten der Anoden in den Probekörpern „W-CI-Multi“ über die in Abschnitt 5.6.2 dargestellte ZRA-Messung über einen Messzeitraum von 450 Tagen. Vor der Bestimmung des Elementstroms wurde das freie Korrosionspotential der Anoden über die Zeit erfasst. Zur weiteren Charakterisierung der Korrosionsaktivität wurden an ausgewählten Probekörpern Untersuchungen zum Polarisationswiderstand durchgeführt. Weitere Untersuchungen zur Korrosionscharakteristik mittels Elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS) erfolgten in einer zweiten Untersuchungsreihe an der Prüfkörperserie „W-CI-Plus“.

### 6.4.2 Zeitliche Entwicklung des freien Korrosionspotentials bei der Austrocknung des Betons unter Beschichtungen

Die zeitliche Entwicklung der freien Korrosionspotentiale (vgl. Abbildung 6-21) bezogen auf die Standardwasserstoff-Elektrode zeigt für alle beschichteten und unbeschichteten Probekörper bei einer Lagerung bei 55 % r. F. einen in positive Potentiale weisenden Verlauf. Lediglich die Potentialwerte der bei 98 % r. F. gelagerten Referenzproben bleiben auf einem stabilen negativen Niveau. Die Proben mit den diffusionssperrenden Beschichtungen zeigen nur geringfügig negativere Potentialwerte als die Proben mit der diffusionsoffenen Beschichtung oder die unbeschichteten Proben im trockenen Klima.

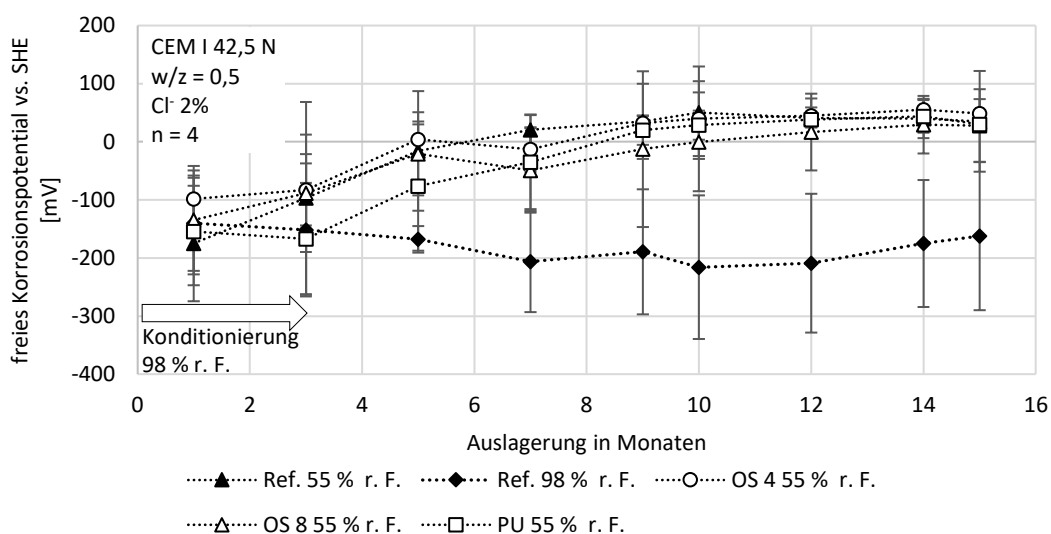


Abbildung 6-21: Zeitliche Entwicklung der freien Korrosionspotentiale vs. SHE über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM I, w/z = 0,50, 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte

Der deutliche Anstieg der freien Korrosionspotentiale der CEM I-Probekörper bei Trockenlagerung in positive Richtung verwundert zunächst, da die spezifischen Elektrolytwiderstände der Probekörper mit diffusionssperrenden Beschichtungen über die Zeit lediglich moderat ansteigen, vgl. hierzu Abbildung 6-18. In Anbetracht der Ergebnisse scheint bereits eine geringfügige Abnahme des Wassergehalts aufgrund elektrokinetischer Effekte an der Anode zu einer Veränderung der Korrosionsprodukte im CEM I-Beton und einem daraus resultierenden deutlichen Anstieg des freien Korrosionspotentials zu führen.

Im Gegensatz dazu konnte dies bei den untersuchten beschichteten CEM III-Betonen nicht in der gleichen Weise festgestellt werden, vgl. Abbildung 6-22. Zwar zeigte sich auch bei den trocken gelagerten Referenzproben sowie bei der diffusionsoffenen OS 4-Beschichtung ein allmählicher Anstieg des Potentials von 100 mV bis 150 mV, nur kann dies mit dem Anstieg des spezifischen Elektrolytwiderstands in Einklang gebracht werden.

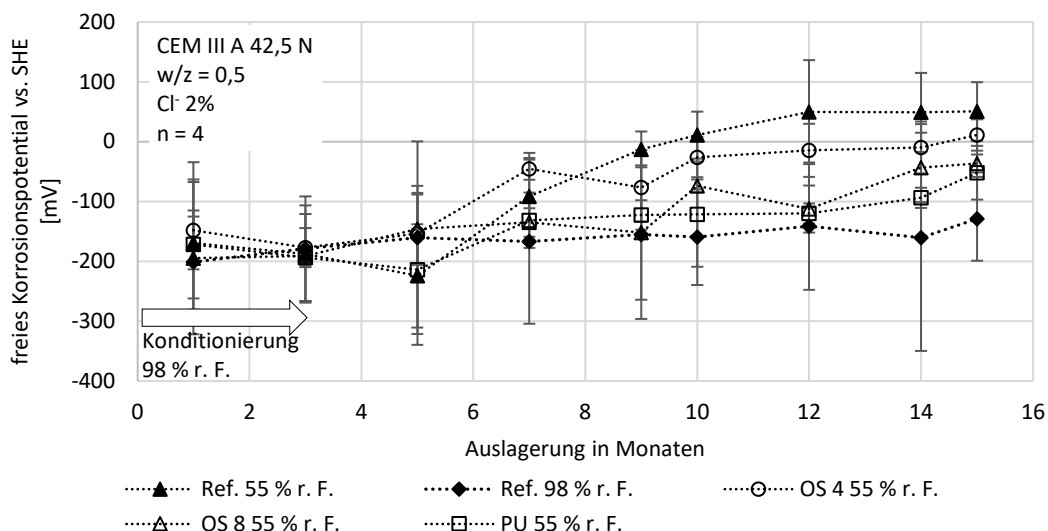


Abbildung 6-22: Zeitliche Entwicklung der freien Korrosionspotentiale vs. SHE über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM III, w/z = 0,50, 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte

Die Änderung der freien Korrosionspotentiale über den Untersuchungszeitraum von rd. zwölf Monaten für sämtliche untersuchte Versuchsparameter ergibt sich aus Abbildung 6-23.

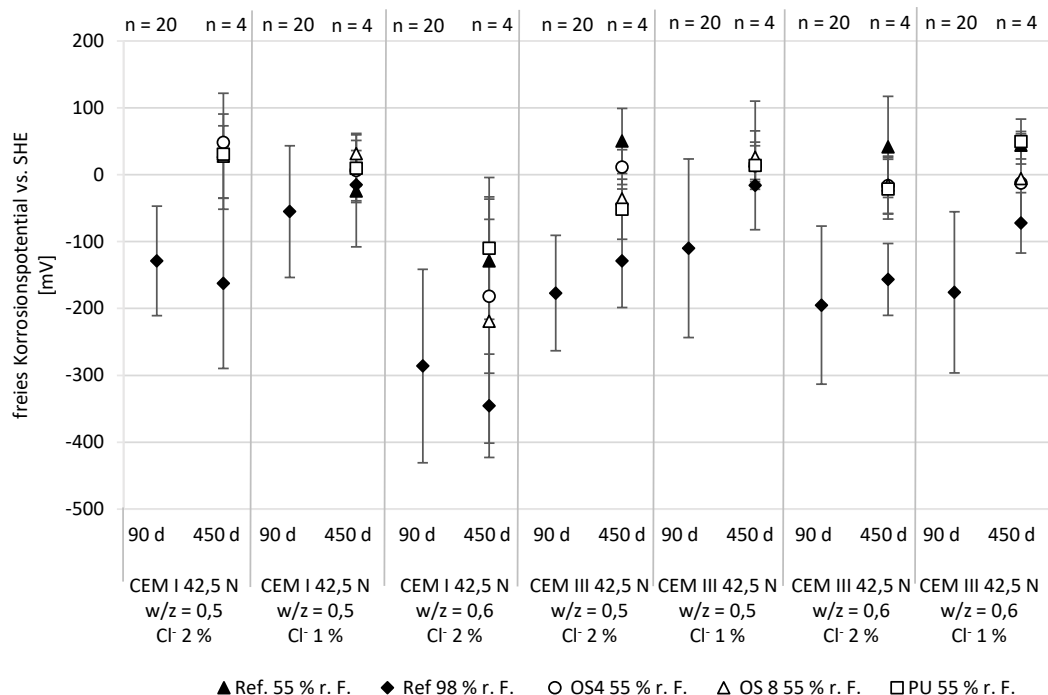


Abbildung 6-23: Darstellung des freien Korrosionspotentials zu Beginn der Auslagerung im Laborklima nach Feuchtelagerung (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte

Insgesamt führt die Auslagerung in den trockenen Klimaten aller untersuchten Probekörper zu einem Anstieg des freien Korrosionspotentials. Infolge einer ausgeprägten Nacherhärtung durch die latent-hydraulische Reaktion ist ein Anstieg des Potentials auch in den CEM III-Betonen bei einer Lagerung in feuchtem Klima festzustellen. Insgesamt zeigen sich die ermittelten Potentiale bei den Proben mit einem Chloridgehalt von 1 M.-%/z positiver als die Potentiale bei Chloridgehalten mit 2 M.-%/z.

Für die Praxis zeigen die Erkenntnisse aus der Potentialmessung in dieser Versuchsanordnung gerade im Hinblick auf sehr positive Potentialwerte eine große Relevanz. So kann beim Korrosionsmonitoring die alleinige Betrachtung der freien Korrosionspotentiale (z. B. durch Einbau von Referenzelektroden) zu einer deutlichen Fehlinterpretation der eigentlichen Korrosionsdynamik (Korrosionsströme oder Elektrolytwiderstände – Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt) führen.

### 6.4.3 Zeitliche Entwicklung der Korrosionsströme bei der Austrocknung des Betons unter Beschichtungen

Abbildung 6-24 zeigt die Entwicklung der Elementstromdichten exemplarisch für die Probekörperreihe CEM I, w/z = 0,5, 2 M.-% Cl/z. Zur Ermittlung der Korrosionsstromdichte wurde der versuchstechnisch bestimmte Elementstrom auf die nachträglich bestimmte Anodenfläche aus Abschnitt 6.5 bezogen.

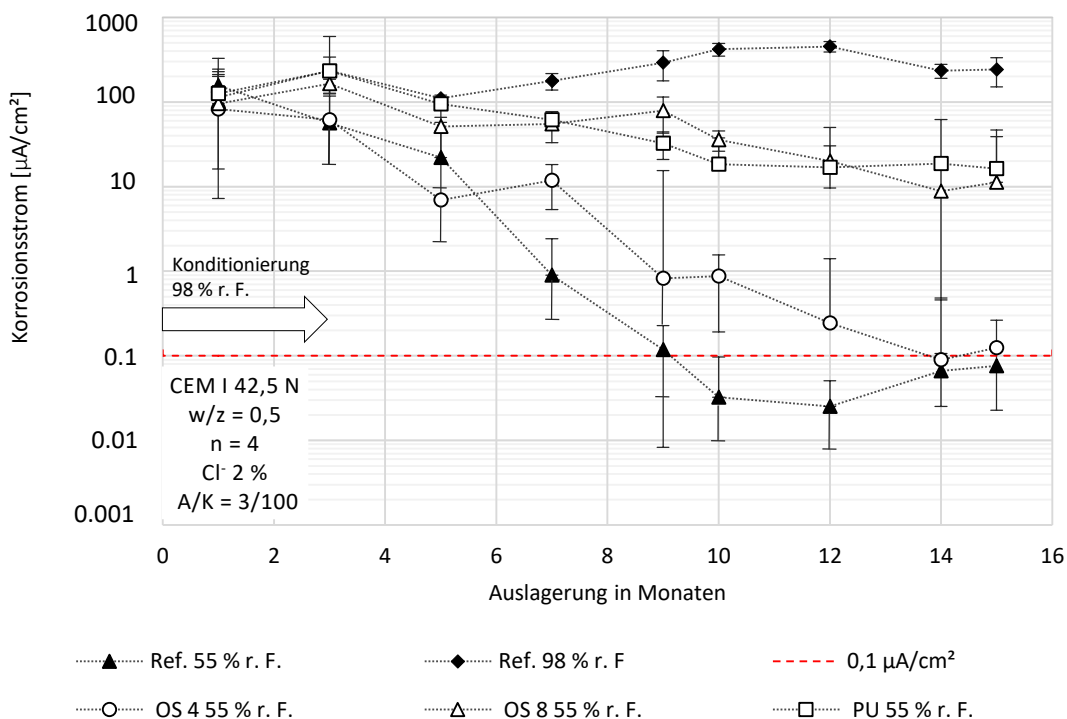


Abbildung 6-24: Entwicklung der Korrosionsstromdichten über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM I, w/z = 0,50, 2 M.-% Cl/z in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte [156]

In der Literatur [97; 99; 100] werden Korrosionsstromdichten von  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  als vernachlässigbar hinsichtlich der Lebensdauer der Bewehrung interpretiert, vgl. Tabelle 4-1. Dieser Schwellenwert wird im Rahmen der Arbeit zur Bewertung als „Passivstromdichte“ herangezogen.

Analog zu den Elektrolytwiderständen (Abbildung 6-18) zeigen die Ergebnisse in Abbildung 6-24 für die Prüfkörper ohne Beschichtung bei Lagerung in feuchtem Klima (98 % r. F.) über die Zeit annähernd konstante Korrosionsstromdichten. Dagegen nehmen die Korrosionsstromdichten der Probekörper ohne Beschichtung bei Trockenlagerung in den ersten neun Monaten kontinuierlich um den Faktor 200 gegenüber den Korrosionsstromdichten bei Feuchtelagerung auf zuletzt unter



0,1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ab. Ebenfalls analog zu den Elektrolytwiderständen liegen die Korrosionsstromdichten der beschichteten Probekörper zwischen denen der feucht bzw. trocken gelagerten Referenzprüfkörper. Die Korrosionsstromdichten der Probekörper mit einer eher diffusionsoffenen OS 4-Beschichtung nähern sich zum Ende des Untersuchungszeitraums denen der unbeschichteten Probekörper bei Trockenlagerung an. Dagegen verharren die Korrosionsströme der Probekörper mit einer OS 8-Beschichtung und PU-Schwimmschicht zuletzt bei rd. 10 bis 20  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  und liegen damit um den Faktor 100 bis 200 über den Passivstromdichten.

Abbildung 6-25 zeigt die ermittelten Korrosionsstromdichten jeweils zu Beginn der Auslagerung im Laborklima (90 d) und zum Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) für sämtliche untersuchten Parameter (Betonarten, Chloridgehalte). Wieder zeigt sich, dass bei den Referenzprüfkörpern aus CEM III-Beton in Feuchtelagerung die ausgeprägte Nacherhärtung zu einer Abnahme der Korrosionsströme führt. Dagegen verbleiben die Korrosionsströme der Probekörper aus CEM III, w/z = 0,50 und 2 M.-% Cl/z auch nach rd. zwölf Monaten Trockenlagerung noch oberhalb der Passivstromdichten.

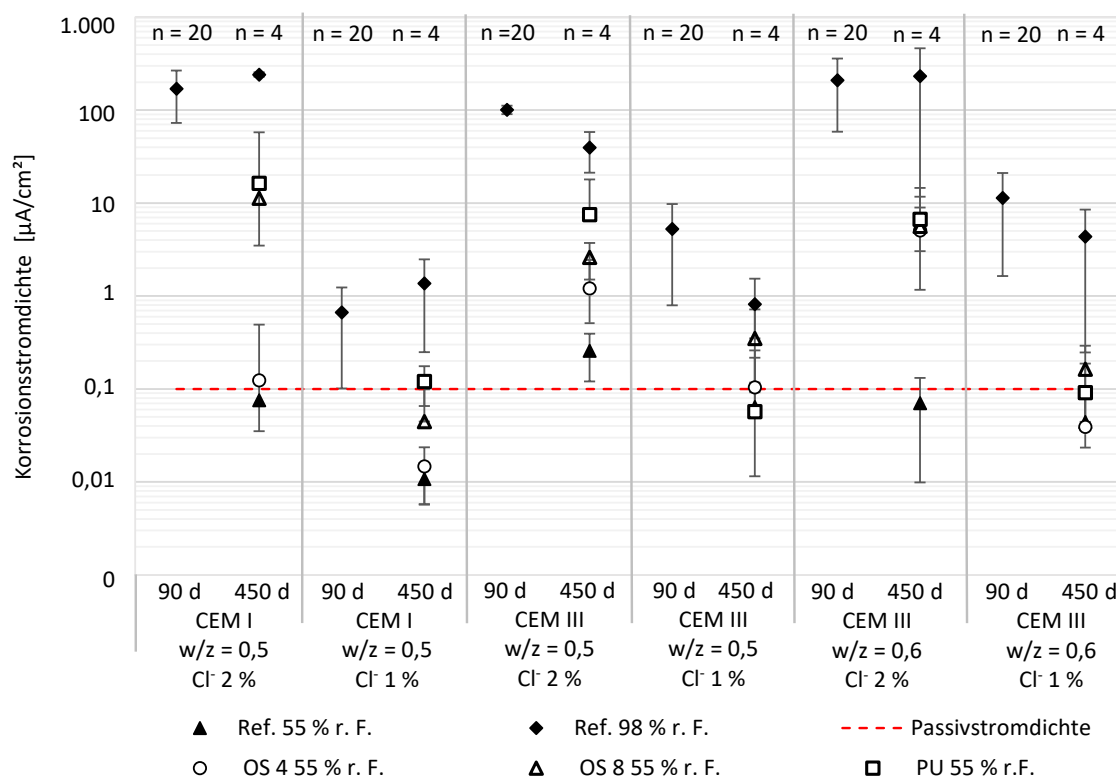


Abbildung 6-25: Entwicklung der Korrosionsstromdichten zu Beginn der Auslagerung im Laborklima nach Feuchtelagerung (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte

Bei den Korrosionsströmen der beschichteten Probekörper nach rd. zwölfmonatiger Trockenlagerung sticht die Bedeutung des Chloridgehalts der Betone ins Auge: Bei Chloridgehalten von 1 M.-% Cl/z sind, unabhängig von der Beschichtungsart, Korrosionsstromdichten von max. 0,5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  festzustellen und damit entsprechend

Abbildung 4-9 von geringer Bedeutung für die Lebensdauer der Bewehrung. Überwiegend liegen die Korrosionsstromdichten bei Betonen mit 1 M.-% Cl/z und trockenen Lagerungsbedingungen im Bereich der Passivstromdichte. Dagegen liegen die Korrosionsstromdichten der Probekörper mit diffusionssperrenden Beschichtungen/Schwimmschichten bei Chloridgehalten von 2 M.-% Cl/z nach zwölfmonatiger Trockenlagerung teils deutlich über 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Diese Korrosionsstromdichten haben nach Abbildung 4-9 einen großen Einfluss auf die Lebensdauerbegrenzung von Stahlbetonbauteilen. Interessanterweise verbleiben bei CEM III-Betonen mit hohen Chloridgehalten (2 M.-% Cl/z) die Korrosionsstromdichten der Probekörper mit der diffusionsoffenen OS 4 Beschichtung im Untersuchungszeitraum weit oberhalb der Passivstromdichten – sogar oberhalb von 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Korreliert man die gemessenen Elektrolytwiderstände mit den Korrosionsstromdichten (hier alle Prüfkörper) jeweils zum Ende des Untersuchungszeitraums, ergibt sich die in Abbildung 6-26 gezeigte Abhängigkeit.

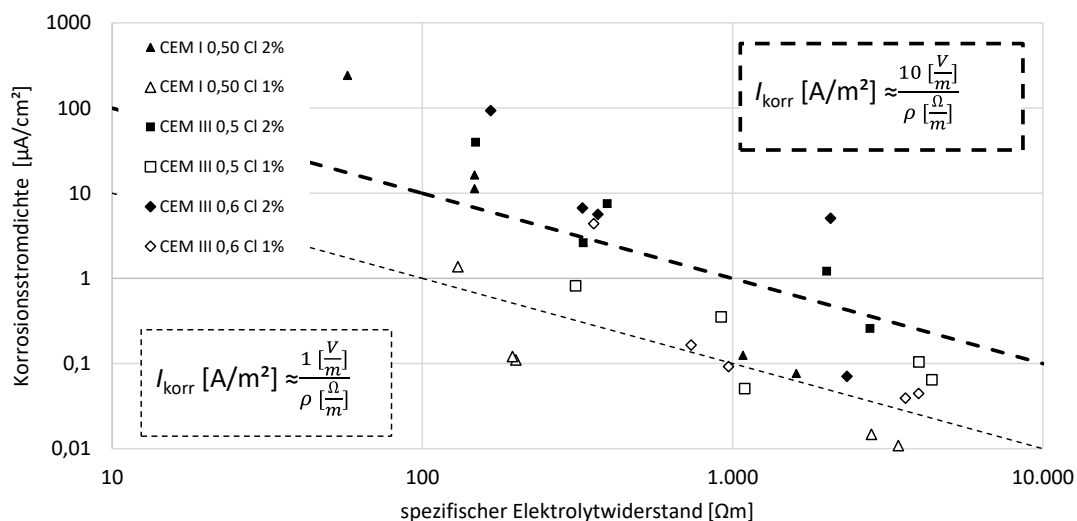


Abbildung 6-26: Korrelation der ermittelten spezifischen Elektrolytwiderstände und der Korrosionsstromdichte zum Ende des Untersuchungszeitraums

Stellt man den mittels ZRA ermittelten Elementstromdichten die mittels der Anodenleiter gemessenen spezifischen Elektrolytwiderstände gegenüber, ist eine deutliche Abnahme der Korrosionsstromdichten mit steigendem Elektrolytwiderstand zu erkennen. Für geringe Chloridgehalte von 1 M.-%/z scheint ein Proportionalitätsfaktor von  $k_0 = 1 \text{ V}/\text{m}$ , vgl. Gleichung 4.14 aus Abschnitt 4.3.3, zwischen Elementstromdichte und Elektrolytwiderstand trotz großer Streuungen eine hinreichende Aussagekraft zu besitzen. Für Chloridgehalte von 2 M.-%/z liegt der Proportionalitätsfaktor  $k_0$  um einen Faktor von 10 bis 100 höher.

Um diese Feststellung in einen Kontext zu setzen, werden die im Versuch ermittelten Ergebnisse an den Prüfkörpern mit 2 M.-% Cl/z in Abbildung 6-27 um Literaturergebnisse aus [32; 36; 107] ergänzt. Oberhalb der von Brem [36] festgestellten Korrosionsstrom-Widerstands-Relation ist von einer Steuerung der

Korrosionskinetik durch den Elektrolyten auszugehen, während bei Wertepaaren unterhalb der Beziehung eine anodische Steuerung vorliegt. Die Ergebnisse bei hohen Wassergehalten zeigen, dass die Streuungen zwar erheblich sind, aber die Werte um die von Brem [36] angegebene Korrelation streuen. Bei hohen Widerständen über 1.000  $\Omega\text{m}$  (verbunden mit geringen Wassergehalten) wird bei den meisten untersuchten Prüfkörpern eine anodische Steuerung dominant: Die Wertepaare liegen deutlich unterhalb der Brem'schen Korrelation. Am Beispiel der Prüfkörper CEM III,  $w/z = 0,6$  zeigt sich aber auch, dass eine Bewertung der Korrosionskinetik über die Bestimmung des Elektrolytwiderstands nicht zielführend ist. Der Prüfkörper mit einer OS 4-Beschichtung hat bei einem Elektrolytwiderstand von 2,1  $\text{k}\Omega\text{m}$  eine Stromdichte von  $5,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , während der Prüfkörper ohne Beschichtung bei einem Elektrolytwiderstand von 2,3  $\text{k}\Omega\text{m}$  eine Stromdichte von  $0,07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  unterhalb der Passivstromdichte aufweist. Somit muss empfohlen werden, dass der Nachweis eines Erfolgs des Verfahrens 8.3 nicht über die Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands erfolgt, sondern über die Messung der Korrosionsstromdichte.

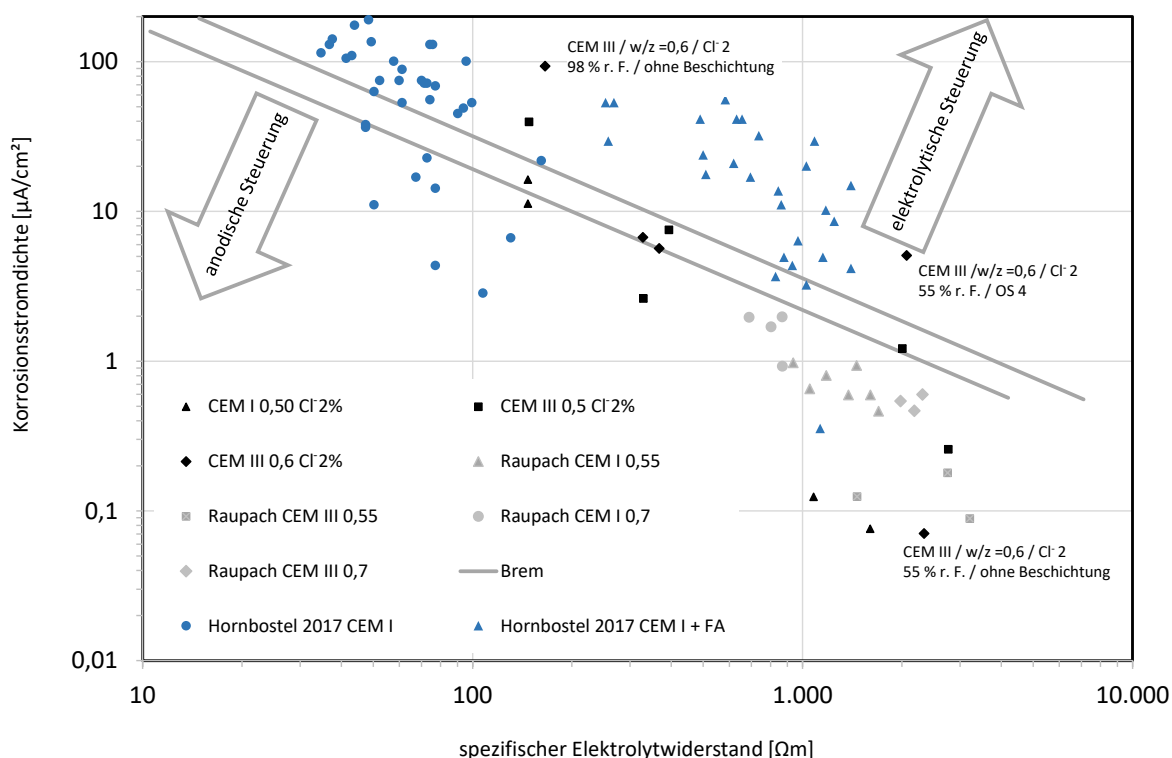


Abbildung 6-27: Doppellogarithmische Darstellung der zum Ende der Auslagerung gemessenen spezifischen Elektrolytwiderstände und der Korrosionsstromdichten mit Vergleichswerten und Auswertung aus [32; 36; 107]

Um die aus den Ergebnissen erwachsende Fragestellung der Kontrollfaktoren beim Korrosionsprozess zu beleuchten, wurden Zusatzuntersuchungen in Form von EIS-Messungen durchgeführt.

#### 6.4.4 Entwicklung des Polarisationswiderstands bei der Austrocknung des Betons

Die Bestimmung der Polarisationswiderstände erfolgte an den unbeschichteten Proben nach 90 Tagen Feuchtlagerung bei 98 % r. F. und 20 °C sowie nach 360 Tagen Lagerung bei einer relativen Feuchte von 55 %. Die Bestimmung des Polarisationswiderstands dient der Bewertung des Korrosionszustandes nach der Austrocknung und soll Informationen über ein passives oder aktives Verhalten des Stahls zu Beginn und zum Ende der Trockenlagerung liefern. Die Bestimmung des Polarisationswiderstands erfolgte IR-kompensiert, vgl. Abbildung 6-28.

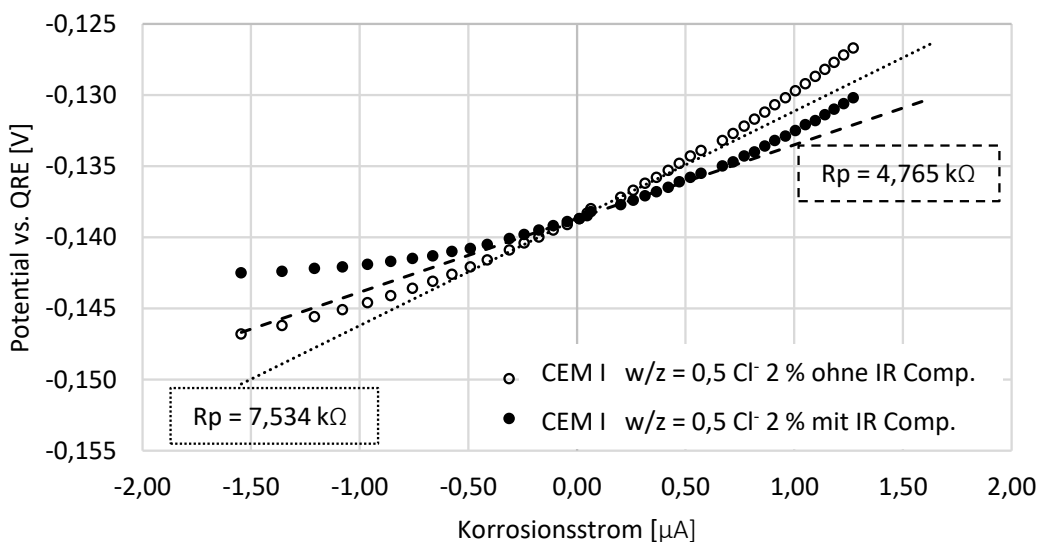


Abbildung 6-28: Exemplarische Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands an einer feuchtgelagerten Referenzprobe CEM I, w/z = 0,5 % Cl<sup>-</sup> 2 M.-%/z

Abbildung 6-29 zeigt die Ergebnisse der Polarisationswiderstandsmessung an den unbeschichteten Probekörpern „W-Cl-Multi“ bei Trockenlagerung für die untersuchten Parameter.

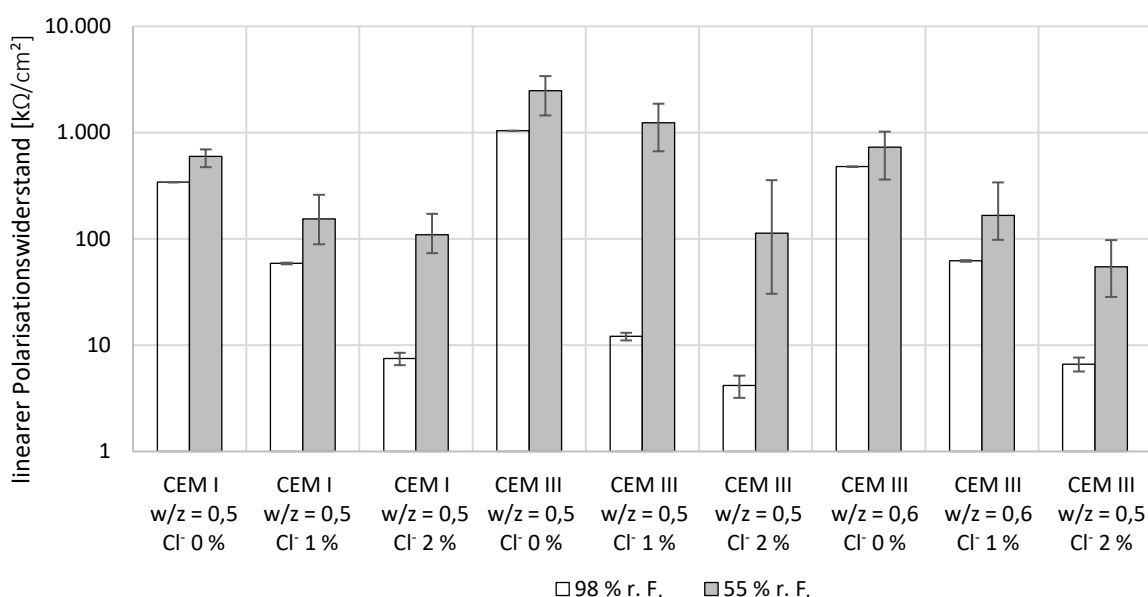


Abbildung 6-29: Entwicklung des Polarisationswiderstands der Referenzproben bei Austrocknung

Betrachtet man die einzelnen Prüfserien, kann ein deutlicher Einfluss des Chloridgehalts auf den Polarisationswiderstand festgestellt werden. Die Anoden der Proben ohne Chloridbelastung lagen zum Untersuchungsbeginn erwartungsgemäß passiv vor und dienen als Vergleichsgrößenmaßstab für ein passives Verhalten der Anoden im chloridhaltigen Beton. Sämtliche Anoden der Proben mit einem Chloridgehalt von 2 M.-%/z können mit einem Polarisationswiderstand  $< 10 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$  als aktiv beschrieben werden. Bei den Proben mit einem Chloridgehalt von 1 M.-%/z zeigte lediglich der CEM III mit einem w/z-Wert von 0,5 ein aktives Verhalten. Über die Austrocknungsdauer von 360 Tagen steigen die Polarisationswiderstände aller Proben deutlich an. Gegen Ende der Auslagerung liegen die Widerstände der mit 2 M.-%/z Chlorid belasteten Proben im Bereich von  $80 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$  bis  $100 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ .

Es ist in der Literatur, z. B. [126], nicht unüblich, dass der Polarisationswiderstand über die Stern-Geary-Gleichung in eine Korrosionsstromdichte umgerechnet wird. Angst und Büchler zeigen in [142], dass die so berechneten Korrosionsstromdichten in Abhängigkeit von der Lage der Referenzelektrode zu großen Abweichungen mit dem tatsächlich gemessenen Makroelementstrom führen kann. Diese Unterschätzung des Korrosionsstroms konnte auch im Rahmen dieser Arbeit festgestellt werden, wie die Ergebnisse aus Abschnitt 6,4.5. zeigen. Allerdings kann durch die Entwicklung der Polarisationswiderstände im Vergleich zur Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands ein Verhältnis gebildet werden, aus dem sich die jeweilige Kontrollfunktion des Widerstands ableiten lässt.

### 6.4.5 Elektrochemische Impedanzspektroskopie in feuchtem und trockenem Beton

Anhand der Gegenüberstellung von Korrosionsstrom und spezifischem Elektrolytwiderstand wird ersichtlich, dass neben der Widerstandskontrolle weitere Kontrollmechanismen die Korrosionsgeschwindigkeit bei abnehmendem Feuchtegehalt bestimmen. Für die Charakterisierung dieser Kontrollmechanismen wurde an den „W-Cl-Plus“-Probekörpern, vgl. Abbildung 5-4, Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)-Messungen durchgeführt.

Im Rahmen der EIS-Messung wurde ein CEM I-Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 und den Chloridgehalten von 0 M.-%/z, 2 M.-%/z und 4 M.-%/z über verschiedene Feuchtebedingungen untersucht. Neben der EIS-Messung wurden an den „W-CL-Plus“ Probekörpern noch der spezifische Elektrolytwiderstand, das freie Korrosionspotential sowie die Korrosionsstromdichte, entsprechend der in Abschnitt 6.2 und 6.3 vorgestellten Untersuchungen bestimmt.

Die Auswertung der EIS-Messung erfolgte mit dem in Abschnitt 5.6.4, Abbildung 5-15 dargestellten Ersatzschaltbild. Das verwendete Ersatzschaltbild lieferte eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen EIS Werten mit einem Goodness of Fit-Wert bis maximal 0,008. Exemplarisch sei hierfür die Darstellung eines trocken gelagerten Betons CEM I mit einem Chloridgehalt von 4 M.-%/z gegeben, vgl. Abbildung 6-30.

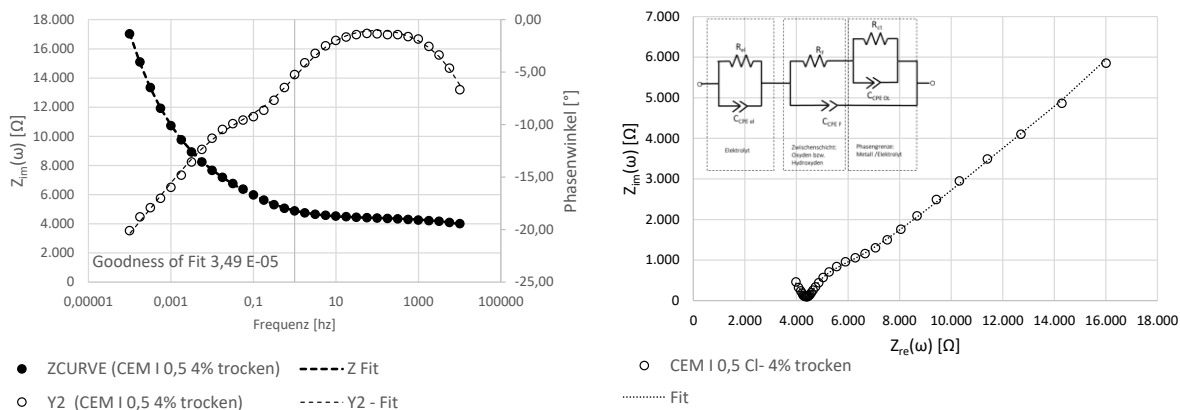


Abbildung 6-30: Exemplarische Auswertung einer EIS Messung an einem CEM I-Beton mit einem Chloridgehalt von 4 M.-%/z bei einer Lagerungsfeuchte von 55 % r. F. links: Bode-Diagramm; rechts: Nyquist-Diagramm mit verwendetem Ersatzschaltbild

Der Einfluss des Chloridgehalts auf die Korrosionsparameter kann durch die EIS-Messung anschaulich dargestellt werden. Bereits ohne weitere Berechnungen kann der qualitative Unterschied der Impedanz zweier Proben mit unterschiedlichen Chloridgehalten veranschaulicht werden. In Abbildung 6-31 zeigt sich die klare Trennung zwischen dem stark chloridbelasteten und dem chloridfreien Beton in einer relativen Feuchte von 55 % deutlich. Qualitativ lassen sich die jeweiligen Realanteile im Nyquist-Plot abschätzen. Der Imaginär-Anteil deutet qualitativ sowohl auf eine

kinetische Kontrolle als auch auf eine Transportkontrolle des Korrosionsvorgangs hin.

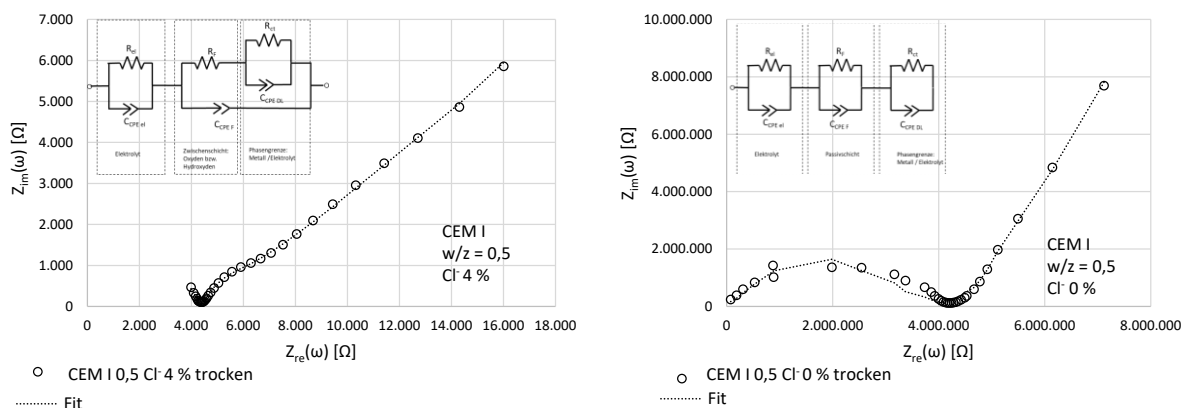


Abbildung 6-31: Vergleich des Einflusses des Chloridgehalts auf die Ergebnisse der EIS-Messung; Links: CEM I mit 4 M.-% Cl⁻/z; Rechts: CEM I mit 0 M.-% Cl⁻/z;

Über die Analyse mittels der Ersatzschaltbilder erfolgt eine quantitative Aussage zu den Kontrollanteilen der Impedanz. Die Ergebnisse der somit berechneten Schaltelemente ergibt sich aus Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Ergebnisse der ausgewerteten EIS-Messung

Probe	Klima*	$R_{el}$	$R_f$	$R_{ct}$	$CPE_{el}$		$CPE_F$		$CPE_{dl}$	
					$Y_{0,el}$	$\alpha_{CPE,e}$	$Y_{0,F}$	$\alpha_{CPE,F}$	$Y_{0,dl}$	$\alpha_{CPE,dl}$
					[% r. F]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[μSs] <sup>α</sup>	[-]
CEM I 0,5 0 M.-%/z	98	0,51	244,0	12,30	0,03	0,43	473,6	0,25	291,0	0,86
	55	105,0	2.65	4.150	12,5	0,49	24,5	0,90	0,01	0,77
CEM I 0,5 2 M.-%/z	98	0,42	0,13	13,20	42,9	0,07	9,970	0,53	360,0	0,61
	55	61,8	14,02	1.400	0,053	0,35	0,001	0,99	77,87	0,22
CEM I 0,5 4 M.-%/z	98	0,18	0,04	1,05	136,0	0,46	61,30	0,66	1.17	0,52
	55	4,41	0,17	672,0	0,14	0,53	0,018	0,30	73,08	0,33

\*Probekörper gelagert

Die Ergebnisse der EIS-Messung zeigen für den untersuchten Beton in Abhängigkeit vom Chloridgehalt deutliche Unterschiede. Bei einer Feuchtebedingung von 98 % r. F. zeigt sich sowohl der Beton mit 2 M.-% Cl⁻/z als auch der Beton mit 4 M.-% Cl⁻/z mit sehr geringen Polarisationswiderständen (Oxidschicht  $R_{F+}$  Durchtrittswiderstand  $R_{ct}$ ) deutlich aktiv. Der chloridfreie Beton zeigt mit einem hohen Ohm'schen Widerstand im Bereich der Oxidschicht ( $R_F$ ) ein passives Verhalten.

Mit der Austrocknung verschieben sich die ermittelten Widerstände deutlich zu höheren Werten. Setzt man die Summe der Widerstände zu 100 %, lässt sich der Anteil der Kontrollfaktoren im jeweiligen Zustand beschreiben, vgl. Abbildung 6-32.

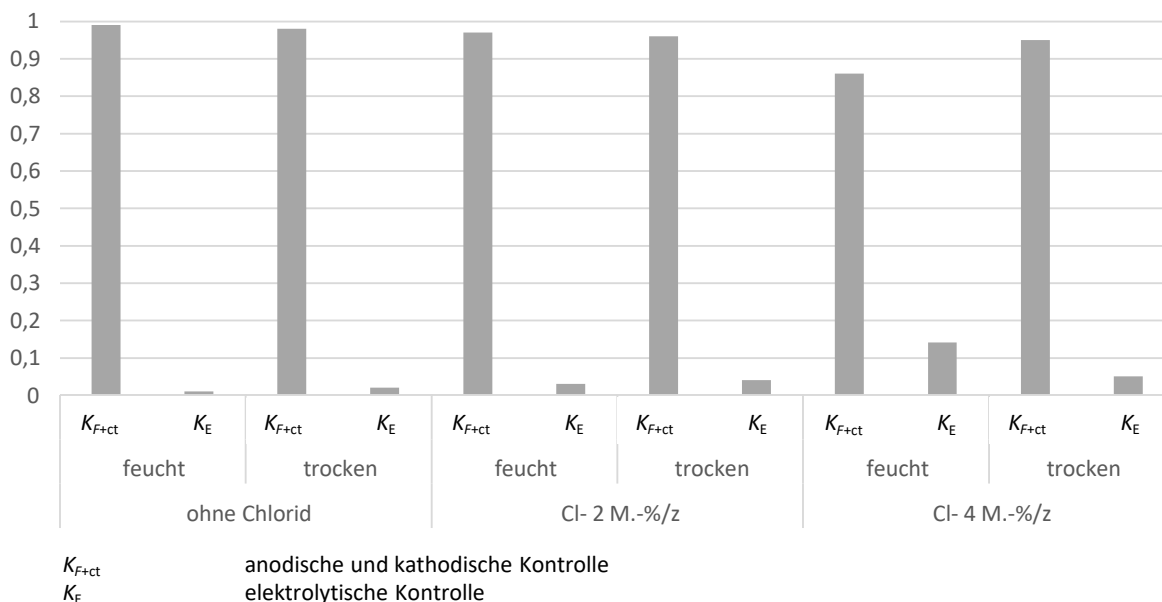


Abbildung 6-32: Kontrollfaktoren des Korrosionszustands für die mittels EIS-Messung untersuchten Zustände des CEM I-Betons

In allen untersuchten Varianten ist der Kontrollanteil des Polarisationswiderstands (Passivschicht  $R_F$  + Durchtrittswiderstand  $R_{CT}$ ) der Anode der maßgebliche, dominante Kontrollfaktor. Bei passiven ( $Cl^- = 0$  M.-%) und moderat korrodierenden ( $Cl^- = 2$  M.-%) Korrosionssystemen erhöht sich der Anteil der elektrolytischen Kontrolle über die Austrocknung leicht. Für aktive Korrosionssysteme, mit hohen Korrosionsraten ( $Cl^- = 4$  M.-%) und sehr niedrigen Polarisationswiderständen erreicht der Elektrolytwiderstand bei feuchten Bedingungen einen Kontrollfaktor von rd. 13 %. Über die Austrocknung erfolgt eine deutliche Erhöhung des Durchtrittswiderstands am Bewehrungsstahl. Dieser Effekt überlagert in seiner Ausprägung die Zunahme des Elektrolytwiderstands deutlich, sodass der Kontrollanteil des Polarisationswiderstands über die Austrocknung dominanter wird.

Die  $Y_0$ -Werte der chloridfreien Probe liegen sowohl bei Feuchtelagerung als auch bei trockener Lagerung deutlich unter den Ergebnissen der chloridbelasteten Proben. Über die Trocknung sinken die  $Y_0$ -Werte, was gut mit Ergebnissen von [114; 154] in Übereinstimmung gebracht werden kann. Die Betrachtung des Exponenten  $\alpha_{CPE}$  zeigt für die austrocknenden Betone, dass das Constant Phase Element mit einem Wert  $\alpha_{CPE,el}$  von um 0,5 einem diffusionsgesteuerten Warburg-Element entspricht. Hier ist davon auszugehen, dass neben der Widerstandssteuerung auch eine Diffusionssteuerung, also eine Transportkontrolle den Korrosionsprozess an der Anode maßgeblich mitbestimmt.



Aus dem Widerstand der Passivschicht  $R_F$  und dem Durchtrittswiderstand  $R_{CT}$  wird der Polarisationswiderstand gebildet. In Analogie zur Bestimmung der Korrosionsstromdichte aus dem linearen Polarisationswiderstand in Abschnitt 5.6.3. wird auch hier die Korrosionsstromdichte über die Stern-Geary-Gleichung abgeschätzt.

Die Ergebnisse der EIS-Messung liegen mit den gewählten Ersatzschaltbildern sowohl für den feuchten als auch den trockenen Beton in einer vergleichbaren Größenordnung, gemessen an den Ergebnissen der Polarisationswiderstandsmessungen und den Ergebnissen des Makrokorrosionsstroms aus der ZRA-Messung, vgl. Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Einordnung der Ergebnisse aus der EIS-Messung im Vergleich zur Messung des linearen Polarisationswiderstands und zur Korrosionsstrommessung (ZRA)

Zustand	Beton	EIS-Messung	PoRe	ZRA
		$i_{korr}$	$i_{korr}$	$i_{korr}$
		[ $\mu A/cm^2$ ]	[ $\mu A/cm^2$ ]	[ $\mu A/cm^2$ ]
feucht 98 % r. F.	CEM I, w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 0 %	1,5	3,4	3,1
	CEM I, w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 %	3,1	11,1	175,0
	CEM I, w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 4 %	311,0	125,6	963,0
trocken 55 % r. F.	CEM I, w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 0 %	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
	CEM I, w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 %	$23,0 \cdot 10^{-3}$	$304,0 \cdot 10^{-3}$	$71,0 \cdot 10^{-3}$
	CEM I, w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 4 %	$390,0 \cdot 10^{-3}$	$3200,0 \cdot 10^{-3}$	$980,0 \cdot 10^{-3}$

#### **6.4.6 Zusammenfassung der Entwicklung der Korrosionsparameter bei Austrocknung des Betons über die Zeit**

Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ermittelten Ergebnisse zum Korrosionsverhalten des Bewehrungsstahls in chloridbelastetem Beton bei trockenen Umgebungsbedingungen zeigen eine Korrelation zwischen dem Elektrolytwiderstand des Betons und der ermittelten Korrosionsstromdichte. Es zeigt sich aber auch, dass die Erhöhung des Elektrolytwiderstands des Betons nicht allein maßgeblich für die Korrosionsreduzierung am Bewehrungsstahl ist. In austrocknenden Systemen ergibt sich eine zunehmende Diffusionshemmung an der Anode sowie eine deutliche Erhöhung des Polarisationswiderstands und eine Verschiebung des freien Korrosionspotentials in positive Richtung.

Für das Verfahren 8.3 lassen sich aus den ermittelten Ergebnissen zur Entwicklung der elektrochemischen Korrosionsparameter über die Zeit folgende Erkenntnisse ableiten:

- Unter sehr trockenen Bedingungen und bei niedrigem Chloridgehalt  $\leq 1 \text{ M.-%/z}$  reduziert sich die Korrosionsstromdichte des Stahls im Beton auch mit diffusionsbremsenden Beschichtungen so weit, dass der korrosionsbedingte Einfluss auf die Lebensdauer als gering bis vernachlässigbar bewertet werden kann.
- Für Chloridgehalte bis  $2 \text{ M.-%/z}$  lässt sich in Abhängigkeit vom Bindemittel bei diffusionsoffenen Beschichtungen eine deutliche Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit feststellen.
- Für diffusionsbremsende Beschichtungen und Chloridgehalte bis  $2 \text{ M.-%/z}$  liegt eine deutlich lebensdauerbegrenzende Korrosionsstromdichte vor.
- Die Messung des freien Korrosionspotentials kann zu einer deutlichen Unterschätzung der Korrosionskinetik führen.
- Zwischen der Austrocknung des Betons und der Korrosionsstromdichte kann auch für chloridbelastete Betone eine Korrelation festgestellt werden. Die Austrocknung hat dabei einen multikausalen Effekt sowohl auf den spezifischen Elektrolytwiderstand als auch auf die anderen Kontrollfaktoren der Korrosion. Die anodische Kontrolle nimmt hierbei eine maßgebliche steuernde Funktion ein.
- Die anodische Kontrolle der Korrosion ist maßgeblich auf eine Diffusionssteuerung an der Anode und nicht auf eine erneute Passivschichtbildung am Bewehrungsstahl zurückzuführen.

## 6.5 Ergebnisse der optischen Oberflächenuntersuchung

Beim Ausbau der Stahlanoden zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Korrosionserscheinung und kleinen Inhomogenitäten in der Kontaktzone Beton/Stahl in Form von kleinen Verdichtungsporen oder Luftporen, die überwiegend auch mit Korrosionsprodukten gefüllt waren, vgl. Abbildung 6-33.

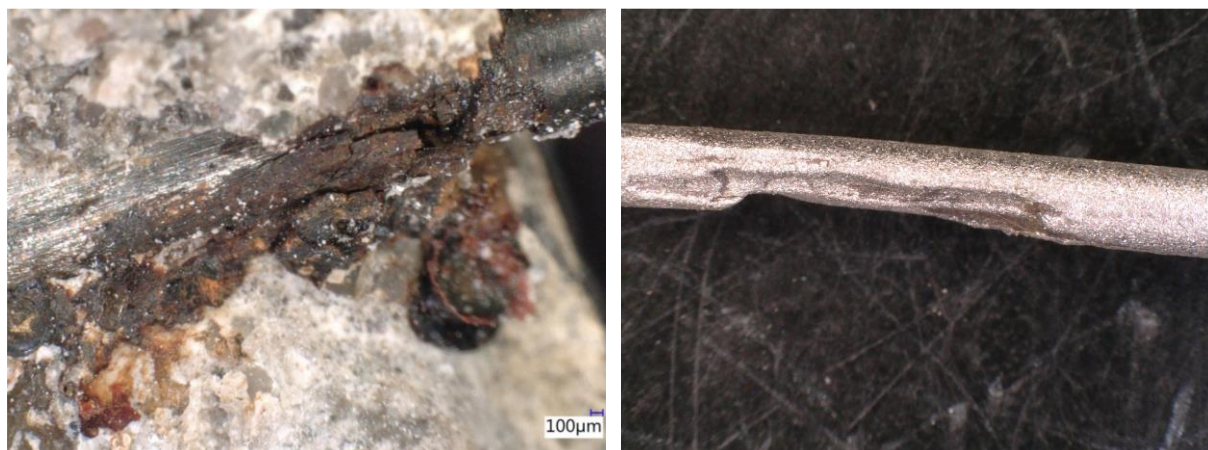


Abbildung 6-33: Korrosionsprodukte um die Stahlanode (links), ausgebaute Stahlanode nach dem Beizen (rechts)

Die Anodenflächen wurden unter dem Auflichtmikroskop vermessen. Tabelle 6-3 zeigt die gemittelte Anodengröße je untersuchtem Betonparameter. Sofern keine abgrenzbaren Korrosionsflächen erkennbar waren, wurde die ursprünglich Anodenfläche von 0,6 cm<sup>2</sup> für die Bestimmung der Korrosionsstromdichte verwendet.

Tabelle 6-3: Ergebnisse der ermittelten Anodenflächen

Probe	Oberflächenschutz	Klima*	Mittlere Anodenfläche
		[% r. F.]	[cm <sup>2</sup> ]
CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z	ohne	55	0,051
	OS 4		0,020
	OS 8		0,015
	PU		0,021
	ohne	98	0,055
CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z	ohne	55	0,6
	OS 4		0,6
	OS 8		0,6
	PU		0,6
	ohne	98	0,20

Probe	Oberflächenschutz	Klima*	Mittlere Anodenfläche
		[% r. F.]	[cm <sup>2</sup> ]
CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z	ohne	55	0,06
	OS 4		0,05
	OS 8		0,06
	PU		0,10
	ohne	98	0,05
CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z	ohne	55	0,60
	OS 4		0,60
	OS 8		0,60
	PU		0,60
	ohne	98	0,60
CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z	ohne	55	0,05
	OS 4		0,02
	OS 8		0,02
	PU		0,02
	ohne	98	0,06
CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z	ohne	55	0,09
	OS 4		0,22
	OS 8		0,31
	PU		0,20
	ohne	98	0,05

\*Probekörper gelagert

Die Anoden der CEM I wie auch der CEM III-Betone mit 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z zeigen nach dem Beizen deutliche Lochkorrosionsnarben. Die Anodenflächen dieser Narben sind flächenmäßig sehr begrenzt, was sich entsprechend deutlich auf die Korrosionsstromdichte auswirkt. Die Anoden bei Betonen mit 1 M.-% Cl<sup>-</sup>/z zeigten ausschließlich bei dem CEM III-Beton mit einem w/z-Wert von 0,6 sichtbare Korrosionsspuren. Wobei hier gerade unter den Oberflächenschutzsystemen eher eine flächige Korrosion ohne ausgeprägte Mulden erkennbar war.

## 7 Numerische Simulation des Austrocknungsverhaltens

### 7.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Kapitels wird das Austrocknungsverhalten von chloridfreien und chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen in einer Tiefgarage unter realen Feuchtebedingungen mit den unter Abschnitt 6.2 ermittelten Feuchtespeicherfunktionen numerisch untersucht. Über die Änderung des Wassergehalts auf Höhe der Bewehrung kann nachvollzogen werden, ob die Randbedingungen in der Tiefgarage eine korrosionsbegrenzende Austrocknung überhaupt zulassen.

Die numerische Simulation des Feuchtetransports erfolgt eindimensional über das Programm Wärme und Feuchte Instationär (WUFI) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP). Bei den bemessenen Bauteilen soll es sich um 10 Jahre alte, teilweise chloridbelastete Stahlbetonbauteile handeln. Entsprechend werden für beide Seiten des Bauteils die gleichen Klimadaten angesetzt. Die Austrocknung und die Wiederbefeuchtung erfolgt eindimensional, aber entsprechend von zwei Seiten. Die Bauteildicke wurde mit 50 cm gewählt und entspricht damit einer massiven Stahlbetonstütze bzw. Stahlbetondecke.

Einflüsse aus Sonneneinstrahlung, Wind und Niederschlag entfallen. Ein direkter Wassereintrag aus Spritzwasser bleibt in der Simulation unberücksichtigt, da das Verfahren 8.3 eine direkte Wasseraufnahme durch die Applikation einer Beschichtung ausschließt. Diese Randbedingung wird auch für die „Best Case“-Simulation eines unbeschichteten Betons angenommen, auch wenn hier baupraktisch eine direkte Wasseraufnahme aufgrund von Spritzwasser oder Pfützenbildung zu erwarten ist. Effekte einer Chloridumverteilung über den Betrachtungszeitraum bleiben numerisch unberücksichtigt.

Neben der Bauteildicke werden in der Simulation weitere relevante Stoffkennwerte berücksichtigt. Hierzu zählen:

- Rohdichte
- Porosität
- Feuchtespeicherfunktion
- Spezifische Wärmekapazität \*
- Wärmeleitfähigkeit \*
- Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl\*

Die mit \* gekennzeichneten Stoffkennwerte wurden aus der Materialdatenbank des Programms WUFI für die verwendete Bindemittelart entnommen.

## 7.2 Klimatische Feuchteszenarien der Simulation

Die klimatischen Randbedingungen der relativen Luftfeuchte und der Temperatur werden aus realen Klimadatenmessungen einer Tiefgarage aus Berlin (gemäßigte Klimazone) übernommen. Die Datenerfassung erfolgt dabei über einen Messzeitraum von zwei Jahren mittels der Datenlogger *175 H1* der Firma Testo. Grundlage für die Simulation bieten zwei Feuchte- und Temperaturprofile der Tiefgarage. Klimaprofil 1, vgl. Abbildung 7-1. Das Klimaprofil entspricht dabei einem Tiefgaragenklima im Bereich der Tiefgarageneinfahrt mit einer hohen Frequenz an Feuchtwechseln. Die relative Luftfeuchte liegt hierbei im Jahresmittel bei 60,9 %, bei einer maximalen Luftfeuchte von 94,7 % und einer minimalen Luftfeuchte von 25,2 %.

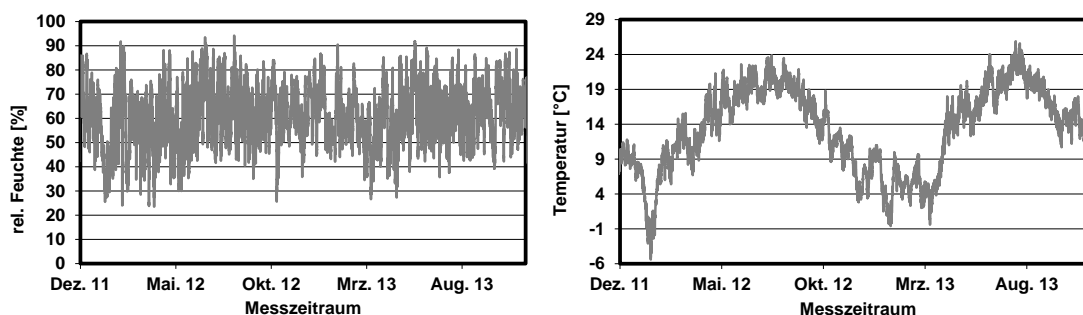


Abbildung 7-1: Klimaprofil 1 einer mehrjährigen Messung in einer Tiefgarage in Berlin (Feuchte links, Temperatur rechts)

Das untersuchte Klimaprofil 2, vgl. Abbildung 7-2, entspricht einem trockenen, schwach beheiztem Klima des Tiefgaragen/Kellerkomplexes, mit einer mittleren relativen Luftfeuchte über die zwei Jahre von 50 % bei einer maximalen Luftfeuchte von 85 % und einer geringsten Luftfeuchte von 12 %.

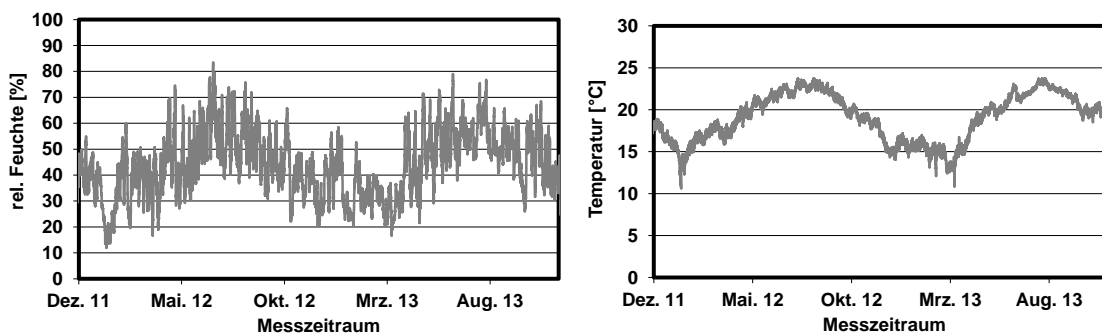


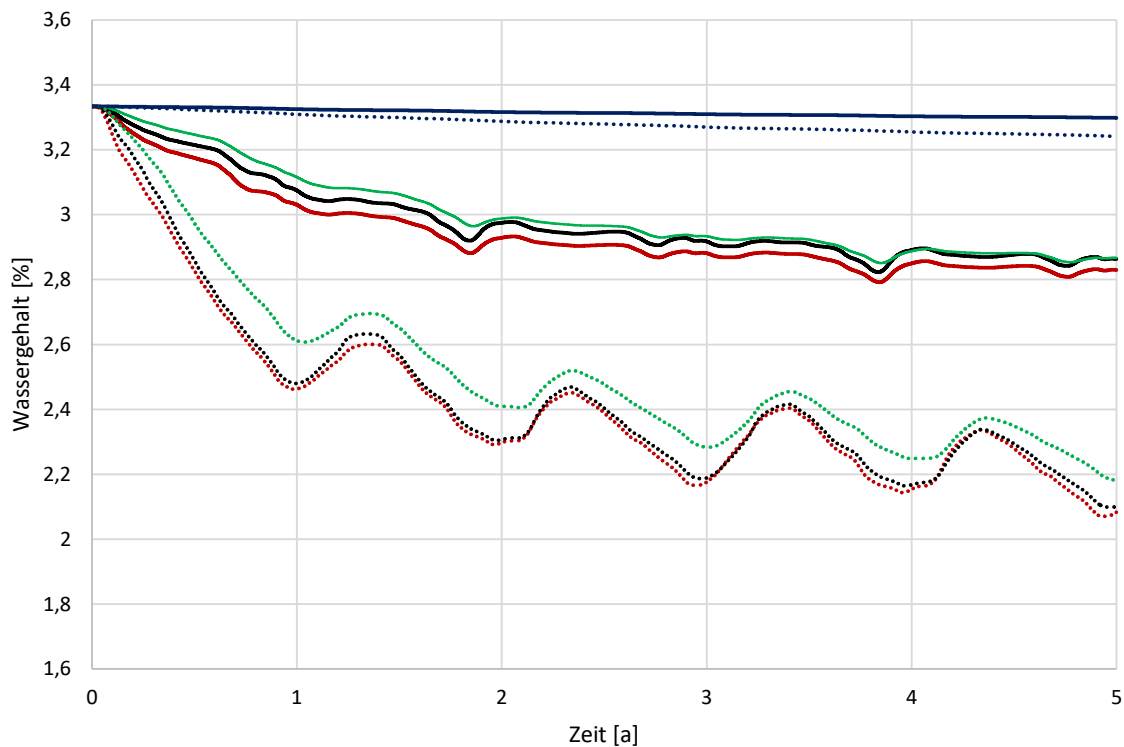
Abbildung 7-2: Klimaprofil 2 einer mehrjährigen Messung in einer Tiefgarage in Berlin (Feuchte links, Temperatur rechts)

Die Klimadaten wurden im Rahmen eines Projekts der Ingenieurgesellschaft Dauberschmidt und Vestner mbH erfasst. Die Nutzung der Daten erfolgt nach Genehmigung der Ingenieurgesellschaft.

### 7.3 Austrocknungsverhalten von chloridfreien und chloridbelasteten Bauteilen unter den Feuchtebedingungen einer Tiefgarage

Die Austrocknung eines vertikalen Stahlbetonbauteils über die Zeit wird für die oben dargestellten Klimaprofile in Abbildung 7-3 dargestellt. Die Änderung des Wassergehalts über einen Beobachtungszeitraum von fünf Jahren bezieht sich dabei auf eine Bauteiltiefe von 25 mm. Dies entspricht in der Praxis einer typischen Betondeckung für Stahlbetonbauteile, bei der sich im Zuge einer Chloridexposition eine Dauerhaftigkeitsproblematik ergibt.

Als Parameter der Simulation werden die ermittelten Sorptionsisothermen (Adsorption und Desorption) aus Abschnitt 6.2 sowie die unterschiedlichen Beschichtungsvarianten, vgl. Abschnitt 5.3.2 berücksichtigt. Als Ausgangsparameter wird eine relative Bauteilfeuchte von 80 % über die gesamte Bauteildicke sowie eine Bauteilinnentemperatur von 15 °C gewählt.



Beton	Klimaprofil 1	Klimaprofil 2	Beschichtungsart
CEM I , w/z = 0,5, Cl <sup>-</sup> 0 %	— (Red)	⋯ (Red)	ohne Beschichtung
CEM I , w/z = 0,5, Cl <sup>-</sup> 2 %	— (Black)	⋯ (Black)	ohne Beschichtung
CEM I , w/z = 0,5, Cl <sup>-</sup> 2 %	— (Green)	⋯ (Green)	Beschichtung OS 4
CEM I , w/z = 0,5, Cl <sup>-</sup> 2 %	— (Blue)	⋯ (Blue)	Beschichtung OS 8

Abbildung 7-3: Austrocknungsverhalten eines Stahlbetonbauteils in einer Schichttiefe von 25 mm mit vertikaler Ausrichtung und einer Bauteildicke von 0,50 m über einen Beobachtungszeitraum von fünf Jahren für zwei Feuchteprofile einer Tiefgarage über die Variation der Beschichtungssysteme und des Chloridgehalts

Die Ergebnisse der Feuchtesimulation zeigen die Auswirkung der verwendeten Parameter auf das Austrocknungsverhalten.

Klimaprofil 1: Für den unbeschichteten und chloridfreien Beton zeigt sich ein deutliches Austrocknungsverhalten. Hier sinkt der Wassergehalt in einer Bauteiltiefe von 25 mm von ursprünglich 3,35 M.-% auf einen Wert von 2,83 M.-%. Der Wassergehalt verringert sich hierbei um 0,50 M.-% bzw. 12 kg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich dazu reduziert sich der Wassergehalt in dem chloridbelasteten Beton über den Untersuchungszeitraum um 0,47 M.-% von 3,33 M.-% auf 2,86 M.-%, dies entspricht einer Wassermenge von rd. 11,4 kg/m<sup>3</sup>. Die diffusionsoffene Beschichtung bremst das Austrocknungsverhalten des Betons nur sehr geringfügig. Hier kann im Rahmen der Feuchtesimulation eine Abnahme des Wassergehalts von rd. 11,2 kg/m<sup>3</sup> ermittelt werden. Für das Klimaprofil 1 mit einer hohen Feuchtewechselfrequenz zeigt die diffusionsoffene Beschichtung eine dämpfende Wirkung. Die Amplitude zwischen Trocknung und Wiederbefeuchtung reduziert sich im Vergleich zur unbeschichteten Variante. Im Gegensatz dazu zeigt der Beton unter der OS 8-Beschichtung erwartungsgemäß das geringste Austrocknungspotenzial. Über einen Simulationszeitraum von fünf Jahren reduzierte sich der Wassergehalt um 0,04 M.-%. Die stark dämpfende Wirkung der diffusionsbremsenden Beschichtung zeigt sich in der linearen Abnahme der Feuchte über die Zeit.

Klimaprofil 2: Die Ergebnisse der Feuchtesimulation zeigen für das Klimaprofil 2 deutlich ausgeprägte Amplituden zwischen Trocknung und Befeuchtung. Dieser Verlauf folgt aus dem stetigen Tiefgaragenklima mit hohen Luftfeuchten im Sommer und sehr niedrigen Luftfeuchten im Winter. Insgesamt ist eine Austrocknung des Betons über die Zeit erkennbar. Im Vergleich zum Klimaprofil 1 ergibt sich eine deutlich stärkere Austrocknung. Nach einer Austrocknung von fünf Jahren reduziert sich der Wassergehalt in einer Tiefe von 25 mm bei dem chloridfreien unbeschichteten Beton um rd. 1,26 M.-%. Der chloridhaltige Beton zeigt mit einer Reduzierung des Wassergehalts von 25 kg/m<sup>3</sup> in diesem Klimaprofil ebenfalls ein deutliches Austrocknungsverhalten. Im Unterschied zum Austrocknungsverhalten unter Klimaprofil 1 kann für die diffusionsoffene OS 4-Beschichtung in diesem Klimaprofil eine gebremste Austrocknung im Vergleich zu den beiden unbeschichteten Betonvarianten festgestellt werden. Die Austrocknung über die fünf Jahre beträgt 1,15 M.-%. Auch im Klimaprofil 2 zeigt sich für die diffusionsbremsende Beschichtung eine sehr reduzierte Austrocknung. Der Wassergehalt in einer Bauteiltiefe von 25 mm reduziert sich unter der OS 8-Beschichtung von 3,33 M.-% auf 3,24 M.-%.



#### 7.4 Einfluss der Austrocknung auf den spezifischen Elektrolytwiderstand des Stahlbetons

Aus den Ergebnissen der Austrocknungssimulation lässt sich die Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands in einer Bauteiltiefe von 25 mm abschätzen. Auch wenn der Elektrolytwiderstand nicht den dominanten Kontrollfaktor darstellt, ergibt sich über die Austrocknung und der damit verbundenen Erhöhung des Elektrolytwiderstands eine Korrelation zur Diffusionssteuerung an der Anode, aus der sich eine Korrosionsreduzierung ableiten lässt.

Eine Dauerhaftigkeitsproblematik infolge einer Überschreitung des kritischen Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung bei der gewählten Betondeckung ist unter Praxisbedingungen erst nach einer entsprechenden zeitlichen Exposition und damit einem fortgeschrittenen Betonalter mit der damit verbundenen Hydratation zu erwarten. Für die hier vorgenommene Betrachtung wird ein Bauteilalter von zehn Jahren zugrunde gelegt, ab dem der Austrocknungsvorgang simuliert wird.

Um die Ergebnisse aus Abschnitt 7.3 auf diese gewählten Randbedingungen anzupassen, muss die Alterung des Betons und die damit verbundene Entwicklung des Elektrolytwiderstands Berücksichtigung finden. Entsprechend werden die spezifischen Elektrolytwiderstände aus Abbildung 6-11 mit einem Alterungsfaktor aus Osterminski [94] gemäß Gleichung 4-16 extrapoliert. Der Einfluss der Bindemittelhydratation  $f_{E,h}(t)$ , vgl. Gleichung 7-1, wird mit einem Alterungskoeffizienten  $a_E$  von 1,44 auf ein Betonalter  $t = 15$  a und  $t_0 = 0,25$  a berücksichtigt.

$$f_{E,h}(t) = e^{a_E \left(1 - \frac{t_0}{t}\right)^{0,5}} \quad \text{Gleichung 7-1}$$

$f_{E,h}(t)$ :	Faktor zur Berücksichtigung der Bindemittelhydratation	[-]
$a_E$ :	Alterungskoeffizient	[-]
$t_0$ :	Referenzzeitpunkt der Messung des spezifischen Elektrolytwiderstands	[a]
$t$ :	Alter des Betons	[a]

Somit ergibt sich eine Regression des spezifischen Elektrolytwiderstands und des Wassergehalts des gealterten CEM I-Betons, vgl. Abbildung 7-4.

Über den Wassergehalt nach einer fünfjährigen Austrocknung kann nun der spezifische Elektrolytwiderstand ermittelt werden. Die Ergebnisse aus Abbildung 7-4 zeigen, dass die Austrocknung unter einer diffusionsoffenen Beschichtung in Abhängigkeit vom Klimaprofil zu einem spezifischen Elektrolytwiderstand zwischen 1.050  $\Omega\text{m}$  und 2.100  $\Omega\text{m}$  führt. Setzt man den Wert von 1.000  $\Omega\text{m}$  als Grenzwert für einen nennenswerten Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit, zeigt sich, dass

dieser Wert im Beton durch die Applikation einer OS 4-Beschichtung erreicht werden kann. Nachdem dieser Grenzwert hier aber gerade erreicht wird, ist davon auszugehen, dass eine relative Luftfeuchte von im Mittel knapp 60 % im Klimaprofil 1 als obere Grenze angenommen werden kann, ab der eine ausreichende Austrocknung des Betons stattfinden kann. Das trockenere Klimaprofil 2 führt zwar zu einer deutlicheren Austrocknung, ein spezifischer Elektrolytwiderstand im Bereich von 10.000  $\Omega\text{m}$  wird um den Faktor 5 nicht erreicht.

Unter der diffusionsbremsenden OS 8-Beschichtung kann auch unter den sehr trockenen Klimabedingungen des Klimaprofils 2 der Grenzwert von 1.000  $\Omega\text{m}$  nicht erreicht werden. Um diesen Marker zu erreichen, sind nochmals deutlich längere Trocknungszeiten in Verbindung mit einer weiteren Alterung notwendig. Unter baupraktisch realistischen Klimabedingungen sind hierbei Austrocknungszeiten > 20 a wahrscheinlich, wobei der Einfluss aus der Alterung hierbei als dominierender Faktor auftritt.

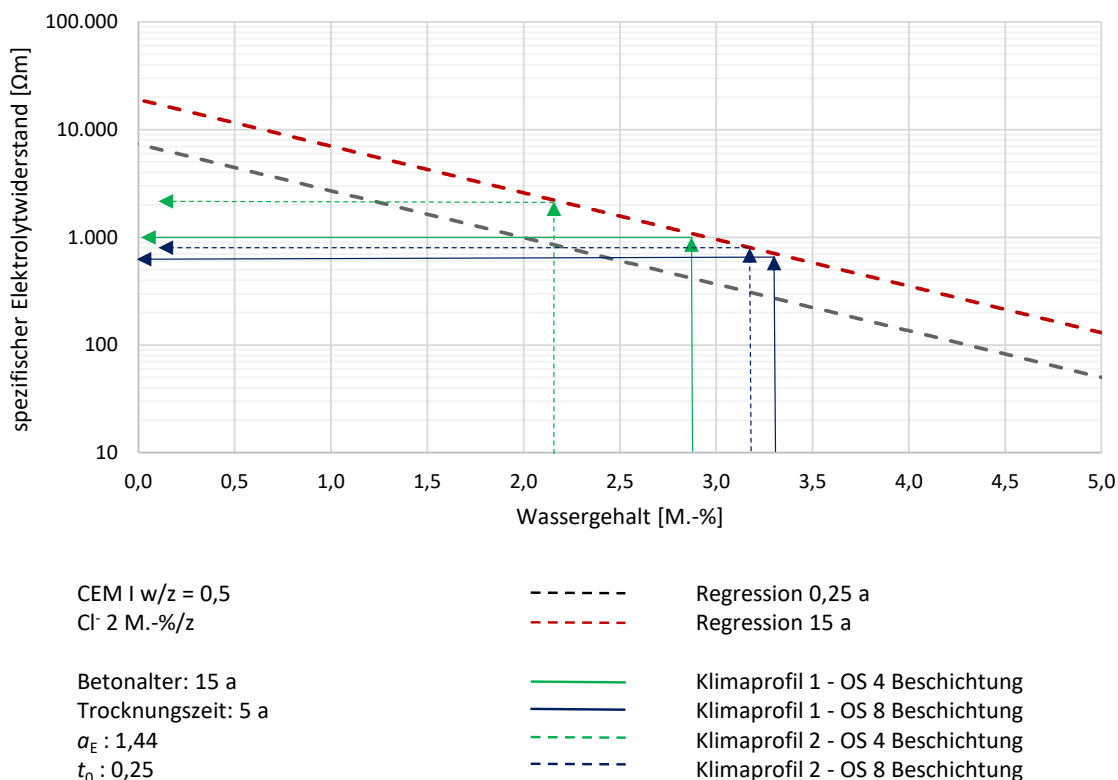


Abbildung 7-4: Spezifischer Elektrolytwiderstand nach einer Austrocknung von fünf Jahren bei einem anzunehmenden Betonalter von 15 Jahren

## 7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der numerischen Simulation

Die Ergebnisse der Trocknungssimulation zeigen für die Austrocknung mit dem Raumklima einer Tiefgarage und der Beschichtungsart zwei Prädiktoren. Unter diffusionsbremsenden Beschichtungssystemen wird die Austrocknung derart verlangsamt, dass hierbei keine nennenswerten Effekte auf den Elektrolytwiderstand und auf die Korrosionskinetik zu erwarten sind. Die diffusionsoffene Beschichtung zeigt für die Austrocknung positive Effekte, so führt sie im Besonderen bei stark schwankenden Luftfeuchtegehalten zu einer Verstärkung der Austrocknung. Der Chloridgehalt zeigt als Parameter für die Austrocknung einen eher untergeordneten Einfluss. Das Klima, unter dem die Austrocknung stattfindet, ist sowohl für die Geschwindigkeit der Austrocknung als auch für die Intensität der Austrocknung der entscheidende Prädiktor. Durch die Simulation kann gezeigt werden, dass eine fünfjährige Austrocknung bei einer relativen Luftfeuchte von im Mittel rd. 61 % unter den gewählten Randbedingungen (Betondeckung 25 mm und Alterung des Betons) zu einem spezifischen Elektrolytwiderstand von  $> 1.000 \Omega\text{m}$  auf Höhe der Bewehrung führt. Im Umkehrschluss lässt sich daraus ableiten, dass bei mittleren rel. Luftfeuchten über 65 % der Anstieg des Elektrolytwiderstands nicht ausreicht, die Korrosionsgeschwindigkeit auf praktisch vernachlässigbare Werte zu senken.

## **8 Schlussfolgerungen**

### **8.1 Allgemeines**

Die gezielte Austrocknung eines chloridbelasteten Betonbauteils und damit die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 bietet im Vergleich zu konventionellen Instandsetzungsverfahren wie dem Verfahren 7.2, aber auch zum Kathodischen Korrosionsschutz, Verfahren 10, ein deutliches wirtschaftliches Potenzial, vgl. Abschnitt 3.4.6. Dem gegenüber steht das technische Risiko einer über die Lebensdauer des Bauwerks nicht ausreichenden Korrosionshemmung, sodass die Dauerhaftigkeit des Stahlbetonbauteils nicht sichergestellt werden kann. Das technische Risiko spiegelt sich entsprechend in der rechtlichen Bewertung des Verfahrens 8.3 wider, vgl. Abschnitt 3.4.5. So ist eine Einordnung des Prinzips in die Anerkannten Regeln der Technik bei hohen Chloridgehalten nach derzeitiger Auffassung z. B. von Mayer et al [39] nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit war es, das Sorptionsverhalten von chloridbelasteten Betonen unter Beschichtungen und die Auswirkung einer Austrocknung auf die Korrosionskinetik des Betons vertieft zu untersuchen und damit die Praxisanwendung des damit verbundenen Instandsetzungsverfahrens 8.3 hinsichtlich der Randbedingungen weiter abzusichern. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse zu den in Abschnitt 2.1 aufgeführten Teilaspekten zusammengefasst.

### **8.2 Sorptionsisotherme**

Die Adsorptions- und Desorptionsisothermen der untersuchten chloridhaltigen Betonproben (bis 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z) unterscheiden sich nur geringfügig von den chloridfreien Proben. Insgesamt zeigt die ausgeprägte Hysterese der Sorptionsisotherme, dass die Ausgleichsfeuchte austrocknender Systeme deutlich über der sich einstellenden Feuchtigkeit bei befeuchteten Systemen liegt. In der Praxis bedeutet dies, dass die Umgebungsbedingungen sehr geringe Luftfeuchten aufweisen müssen, damit die Betone in einem relevanten Maße austrocknen. Hat sich im Beton einmal eine niedrige Ausgleichsfeuchte eingestellt und der konvektive Wasserzutritt wird durch z. B. ein Oberflächenschutzsystem unterbunden, ergibt sich aufgrund der Hysterese eine deutlich reduzierte Wiederbefeuchtung, auch bei hohen Luftfeuchten. Bei einer niedrigen Umgebungsfeuchte von 55 % r. F. zeigten die untersuchten unbeschichteten Probekörper auch bei Chloridgehalten von bis zu 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z ein ausgeprägtes Austrocknungsverhalten.

### **8.3 Austrocknung unter Beschichtungen**

Anhand der gemessenen Elektrolytwiderstände kann festgestellt werden, dass Prüfkörper mit diffusionsoffener OS 4-Beschichtung bei sehr trockenen

Umgebungsbedingungen zwar verlangsamt austrocknen, aber nach rd. zwölfmonatiger Trockenlagerung spezifische Elektrolytwiderstände im Bereich der unbeschichteten Proben erreichen (über 1.000  $\Omega\text{m}$ ).

Dagegen ist bei Prüfkörpern mit diffusionsdichterer OS 8-Beschichtung und PU-Schwimmschicht erwartungsgemäß ein stark gehemmtes Austrocknen feststellbar. Die Elektrolytwiderstände verbleiben um den Faktor 4 bis 10 unter denen der unbeschichteten Probekörper.

Für die Praxis bedeutet dies, dass zur Sicherstellung der Austrocknung von Betonen sehr niedrige Luftfeuchten in der Umgebung erforderlich sind und möglichst diffusionsoffene Beschichtungssysteme zu verwenden sind. Hier zeigte sich im Rahmen der Untersuchungen eine OS 4-Beschichtung hinsichtlich des Austrocknungsverhaltens als geeignet.

#### **8.4 Elektrolytwiderstandsmessung als Methode des Korrosionsmonitorings**

Im Rahmen der Arbeit kann gezeigt werden, dass die gemessene Korrosionsaktivität von Probekörpern mit hohen Wassergehalten mit den spezifischen Widerständen korreliert. Bei niedrigen Wassergehalten, wie sie bei dem Verfahren 8.3 angestrebt werden, ist allerdings der Elektrolytwiderstand kein geeigneter Parameter, um die Korrosionskinetik zu bewerten. Bei hohen Chloridgehalten liegt ein Schwellenwert des spezifischen Elektrolytwiderstands von 1  $\text{k}\Omega\text{m}$  nicht auf der sicheren Seite. Daraus folgend ist die Messungen weiterer Korrosionsparametern neben der Widerstandsmessung erforderlich.

#### **8.5 Potentialmessungen als Methode des Korrosionsmonitorings**

Die Ergebnisse der Messungen der freien Korrosionspotentiale („Ruhepotentiale“) zeigen, dass diese bei Prüfkörpern in Trockenlagerung auch dann deutlich ansteigen, wenn die Prüfkörper unter diffusionsdichten Beschichtungen nur geringfügig ausgetrocknet sind.

Entsprechend ist die ausschließliche Messung des freien Korrosionspotentials zur Bewertung der Wirksamkeit des Verfahrens 8.3 nicht zielführend und kann zu signifikanten Fehleinschätzungen führen.

#### **8.6 Korrosionsstromdichten unter Oberflächenschutzsystemen**

Die Arbeit zeigt, dass die Höhe des Chloridgehalts im Beton den maßgeblichen Parameter für die Anwendung des Verfahrens 8.3 darstellt. Bei Chloridgehalten von 1 M.-%  $\text{Cl}^-/\text{z}$  konnten nach zwölfmonatiger Trockenlagerung maximale Korrosionsstromdichten von 0,5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (nach RILEM von geringer Bedeutung für die Lebensdauer der Bewehrung) auch bei diffusionsdichten Beschichtungssystemen nachgewiesen werden. Die Korrosionsstromdichten der Proben mit diffusionsoffener Beschichtung lagen bei dieser Chloridbelastung sogar unterhalb der

Passivstromdichten. Da gleichzeitig aber die Elektrolytwiderstände unter den diffusionsdichten Beschichtungen vergleichsweise niedrig sind, liegt hier eher die anodische Steuerung der Korrosionskinetik vor („Einschlafen der Korrosionsstelle“).

Bei einer Chloridbelastung von 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z ergibt sich ein deutlich anderes Bild: Hier verbleibt selbst ein unbeschichteter Probekörper mit CEM III, w/z = 0,5 nach zwölfmonatiger Trockenlagerung oberhalb der Passivstromdichte (bis 0,3 µA/cm<sup>2</sup>). Unbeschichtete Probekörper anderer Betonsorten unterschreiten die Passivstromdichten knapp. Die Korrosionsstromdichten der beschichteten Probekörper mit Chloridgehalten von 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z verbleiben auch nach zwölfmonatiger Trockenlagerung weit oberhalb der Passivstromdichten, die der Prüfkörper mit einer diffusionsdichten OS 8-Beschichtung und PU-Schwimmschicht sogar in einem Bereich von 5 - 20 µA/m<sup>2</sup>. Bei Prüfkörpern mit einer diffusionsoffenen Beschichtung und Chloridgehalten von 2 M.-% Cl<sup>-</sup>/z zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Korrosionsstromdichte und Zementart: Bei Probekörpern mit CEM III verbleiben die Korrosionsstromdichten oberhalb von 1 µA/cm<sup>2</sup> (und damit nach RILEM als lebensdauerbegrenzend), bei solchen mit CEM I, w/z = 0,50 im Bereich der Passivstromdichte von 0,1 µA/cm<sup>2</sup>.

### 8.7 Bewertung der Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsverfahrens

- Erforderliche Umgebungsbedingungen am Bauteil:

Eine Hemmung der Korrosion durch Erhöhung des Elektrolytwiderstands und der anderen Teilwiderstände durch das Verfahren 8.3 setzt voraus, dass der Beton des chloridbelasteten Bauteils über die Zeit austrocknen kann. Deshalb muss sichergestellt werden, dass Wasser weder durch die beschichteten Oberflächen noch auf einem anderen Weg in das Bauteil eindringen kann. Insofern entfallen üblicherweise Bauteile, die in Kontakt mit Grundwasser oder feuchtem Baugrund stehen, wie WU-Bodenplatten oder WU-Tiefgaragen-Außenwände. Inwieweit auch der Anfall von Kondenswasser im Bauteilinneren durch z. B. Abkühlung des Bauteils im Winter ein Austrocknen auf unschädliche Wassergehalte verhindert, ist derzeit noch nicht geklärt. Bauteile, die den Anforderungen an die technische Austrocknung entsprechen können, sind z. B. beschichtete Zwischendecken oder aufgehende Innenbauteile.

Für ein Austrocknen von feuchtem, chloridhaltigem Beton (Chloridgehalte bis 1 M.-%/z an der Bewehrung) ist eine möglichst geringe relative Luftfeuchte der Umgebungsluft erforderlich. Aus den durchgeführten Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass bei mittleren relativen Luftfeuchten über 65 % der Anstieg des Elektrolytwiderstands nicht ausreicht, die Korrosionsgeschwindigkeit auf praktisch vernachlässigbare Werte zu senken.

- Chloridgehalt am Bewehrungsstahl:

In [9] wird empfohlen, ab einem Chloridgehalt von 1,5 M.-%/z an der Bewehrung das Verfahren 8.3 nicht mehr anzuwenden. Dieser Anhaltswert kann durch die eigenen

Untersuchungen insoweit bestätigt werden, als bei Chloridgehalten von 1 M.-%/z unabhängig von der Beschichtung Korrosionsstromdichten ermittelt wurden, die hinsichtlich der Lebensdauer von geringer Bedeutung sind. Dagegen lagen die Korrosionsstromdichten bei Chloridgehalten von 2 M.-%/z in Bereichen, die für die Lebensdauer des Bauteils kritisch sind. Insofern ist ab einem Chloridgehalt von über 1 M.-%/z auf Höhe der Bewehrung mit einem erhöhten Risiko zu rechnen, mit der Konsequenz, dass die Anwendung des Verfahrens 8.3 vermutlich nicht erfolgreich ist. Bei 2 M.-% Cl-/z konnte im Labor ein Erfolg an den meisten Prüfkörpern nicht nachgewiesen werden.

- Dichtigkeit des Betons:

Bei hohen Chloridgehalten führen dichte CEM III-Betone,  $w/z = 0,50$ , auch nach langer Trockenlagerung und unbeschichtet zu Korrosionsstromdichten oberhalb der Passivstromdichten. Dagegen sind weniger dichte Betone (CEM I,  $w/z = 0,50$  oder CEM III,  $w/z = 0,60$ ) bei diesen Randbedingungen als passiv zu bewerten.

- Art der Beschichtung

Die Beschichtung verlangsamt das Austrocknen von ursprünglich feuchtem Beton über die beschichtete Oberfläche. Damit verlängert sich der Zeitraum, in dem aktive Korrosion weitgehend ungebremst weiter abläuft. Insofern sollte bei aktiver Korrosion der Bewehrung bei feuchtem Ausgangsbeton ein möglichst diffusionsoffenes Beschichtungssystem appliziert werden. Befahrbar und vor allem rissüberbrückende Beschichtungssysteme verhindern ein Austrocknen durch die Beschichtung in hohem Maße.

Aus den dargestellten Erkenntnissen lässt sich folgender in Abbildung 8-1 dargestellter Entscheidungsbaum für die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 bei bereits depassivierter Bewehrung abbilden.

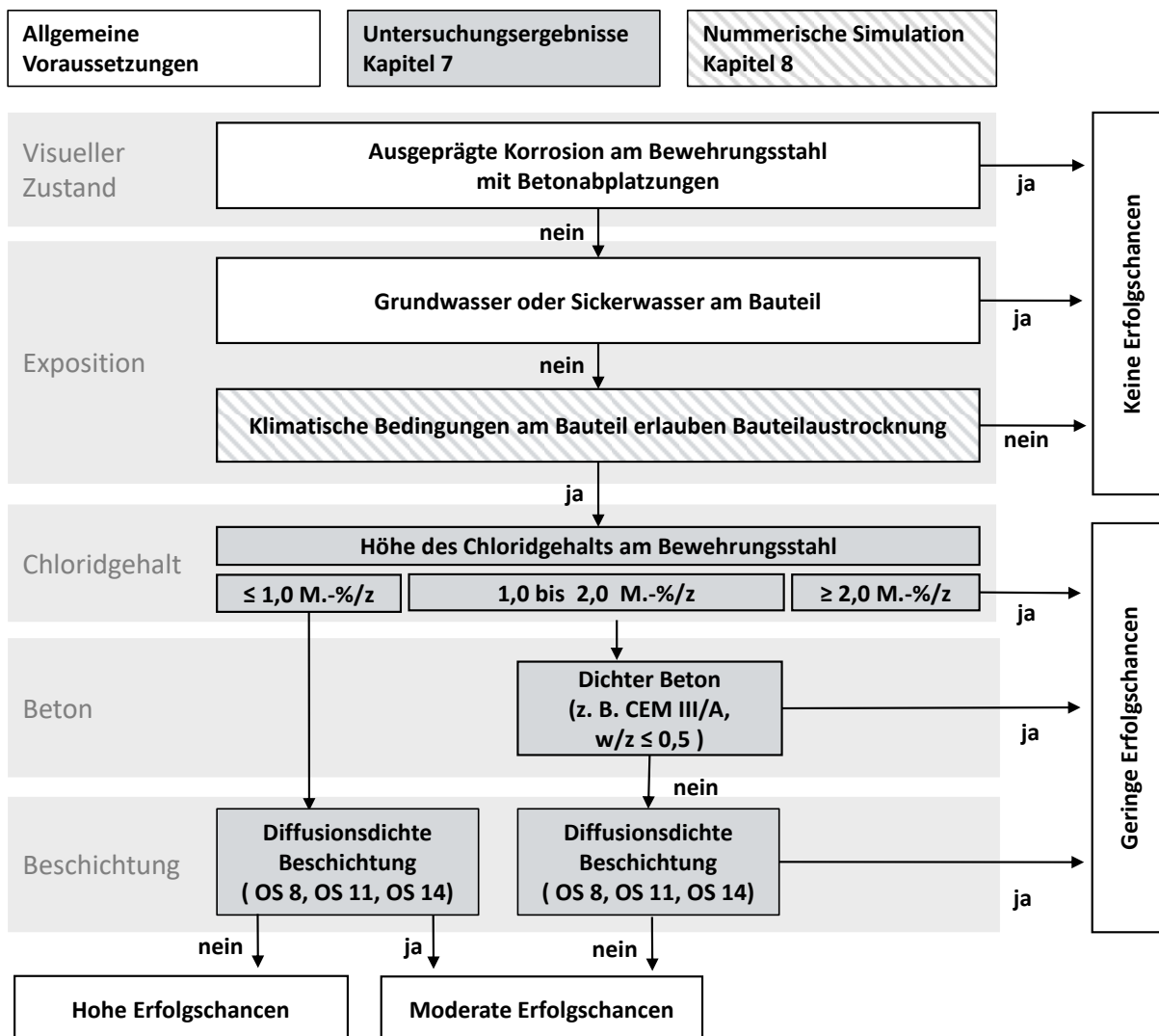


Abbildung 8-1: Entscheidungsbaum für die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 bei bereits depassivierter Bewehrung im ungerissenen Beton

Auf Grundlage der vorliegenden Forschungsergebnisse und einer Übertragung auf beispielhafte praxisnahe Randbedingungen wird in Tabelle 8-1, das mit dem Instandsetzungsverfahren 8.3 verbundene technische Risiko für ungerissene Stahlbetonbauteile mit den in beschriebenen Erfolgchancen aus Abbildung 8-1 verknüpft.



Tabelle 8-1: Technisches Risiko in Abhängigkeit von den Randbedingungen für das Verfahren 8.3

Erfolgschancen	Risiko	Randbedingungen	Bewertung
Hoch	Geringes technisches Risiko	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewehrung passiv</li> <li>▪ Chloridgehalt im Beton &lt; 1,5 M.-%/z*</li> <li>▪ Der Abstand des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts zur Bewehrung <math>\geq 10</math> mm</li> </ul>	Entspricht Verfahren 7.7 nach [9] Umverteilung des vorhandenen Chlorids über den Zeitraum der Restnutzungsdauer führt zu keiner Depassivierung der Bewehrung, vgl. [86]
		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Chloridgehalt an der Bewehrung &lt; 1,0 M.-%/z*</li> <li>▪ Die Umgebungsbedingungen und das Oberflächenschutzsystem erlauben ein Austrocknen des Betons</li> <li>▪ Vor der Ausführung wird durch den Sachkundigen Planer die Resttragfähigkeit nachgewiesen</li> </ul>	Nach der Instandsetzungsmaßnahme ist der Korrosionsfortschritt der Bewehrung von einem Sachkundigen Planer über die Restnutzungsdauer zu überwachen
Moderat	Mittleres technisches Risiko	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Chloridgehalt an der Bewehrung &lt; 2,0 M.-%/z*. ≥ 1,0 M.-%/z*.</li> <li>▪ Die Umgebungsbedingungen und das Oberflächenschutzsystem erlauben ein Austrocknen des Betons</li> <li>▪ Diffusionsoffene Beschichtung</li> </ul>	Hohe Aufklärungspflicht bei Bauherren mit Darstellung der Konsequenzen bei Nichtfunktion der Instandsetzungsmaßnahme Wenn nach der Ausführung der Instandsetzungsmaßnahme die Auswirkung auf den Korrosionsfortschritt der Bewehrung von einem Sachkundigen Planer über die Restnutzungsdauer überprüft wird [9].
Gering	Hohes technisches Risiko	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Chloridgehalt an der Bewehrung &gt; 2,0 M.-%/z*. oder</li> <li>▪ Diffusionsdichtes Oberflächenschutzsystem</li> </ul>	Ein Absenken der Korrosionsraten auf ein unschädliches Niveau ist primär bei der Verwendung von diffusionsbremsenden Beschichtungen nicht zu erwarten. Entsprechend kann die Lebensdauer der Stahlbetonbauteile nicht maßgeblich verlängert werden. Als Instandsetzungsvarianten sind <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verfahren 7.2</li> <li>▪ Verfahren 10 (KKS)</li> </ul> umzusetzen.
*Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit von Grenzwerten beim Chloridgehalt sind die Vorgaben aus [165] zu den Randbedingungen der Betonparameter			

## 9 Ausblick

Das Instandsetzungsverfahren 8.3 nach der vorliegenden Technischen Regel Instandhaltung [9] des Deutschen Instituts für Bautechnik besitzt ein hohes Potenzial, die Dauerhaftigkeit von moderat chloridbelasteten Bauteilen wirtschaftlich und ressourcenschonend sicherzustellen. Bereits heute kann durch die in Kapitel 8 dargestellten Randbedingungen das Verfahren 8.3 unter Einbeziehung eines Sachkundigen Planers zielgerichtet eingesetzt werden. Um das Instandsetzungsverfahren weiter technisch abzusichern und die Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern, sind zwei maßgebliche Entwicklungsansätze in weiteren Forschungsansätzen zu verfolgen:

### Bemessung der Randbedingungen zur Abschätzung des Instandsetzungserfolgs

Für die Abschätzung der Wirksamkeit des Instandsetzungsverfahrens kann ein softwarebasiertes Bemessungsprogramm ein ideales Werkzeug darstellen. Hierbei kann unter der Simulation des Austrocknungsverhaltens von baupraktisch relevanten, chloridbelasteten Betonen mit unterschiedlichen Oberflächenschutzsystemen die Entwicklung des spezifischen Widerstands und, daraus ableitend, auf der sicheren Seite liegend, die instationäre Entwicklung der Korrosionsstromdichten abgebildet werden. Als Datengrundlage für ein solches Bemessungsprogramm stehen die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zur Verfügung. Derzeit gibt es bereits erste Forschungsansätze u. a. der Hochschule München und des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen, die vorhandenen Software-Tools hinsichtlich der instationären Bemessung von Korrosion in Beton zu erweitern.

### Weiterentwicklung des Instandsetzungsprinzips hinsichtlich der Wirksamkeit

Ein weiterer Schritt zur Implementierung des Verfahrens 8.3 in der Breite ist die gezielte Verbesserung der Wirksamkeit der Instandsetzungsmaßnahme, so dass der Instandsetzungserfolg – die Reduzierung der Korrosion – nicht erst Jahre nach der Instandsetzung, sondern nachweislich mit Abschluss der Instandsetzungsmaßnahme eintritt. Hierfür sind die gezielte Trocknung der chloridbelasteten Bauteile und der Einbau von Korrosionszellen nach DIN EN 12969 [27] vorzusehen. Durch Messung der Korrosionszellen während der Trocknung, können die Trocknungsmaßnahmen so gesteuert werden, dass die Korrosionsraten nachweislich auf ein unschädliches Maß reduziert wurden – erst dann sind die Bauteile mittels Beschichtung vor einem erneuten Feuchte- und Chlorideintrag zu schützen. Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten Feuchte- und Widerstandshysteresen bei Trocknung und Wiederbefeuchtung zeigen das Potenzial dieser Verfahrensmodifikation auf. Durch die Modifikation ist davon auszugehen, dass sich die Instandsetzungsdauer im Vergleich zu einer herkömmlichen Instandsetzung nach Verfahren 8.3 verlängert. Jedoch ist es möglich, die Trocknungsmaßnahmen partiell, im laufenden Betrieb, durchzuführen und damit den Nutzungsausfall zu minimieren. Dieser Ansatz der Modifikation wurde unter dem Schlagwort „W-Cl-Heat“ als Forschungsantrag unter Leitung von Prof. Dr. Breit (TU Kaiserslautern) und Prof. Dr. Dauberschmidt (Hochschule München) bei der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) eingereicht und Ende 2020 unter dem Geschäftszeichen BR 4026/9-1 und DA 1325/4-1 bewilligt.

**10 Literatur**

- [1] **Tuutti, K.:** Cracks and corrosion. The corrosion of steel in concrete : the effects of cracks in the concrete cover. Stockholm, Sweden: Cement- och Betonginstitutet, 1978.
- [2] Zahlen und Daten / Verein Deutscher Zementwerke. Berlin, Düsseldorf: VDZ, 2019.
- [3] **Yilmaz, D., Angst, U.:** Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz. Beton- und Stahlbetonbau 115, S. 448–458, 2020.
- [4] **Koch, G. H.:** Corrosion cost and preventive strategies in the United States. McLean, VA: FHA, 2002.
- [5] Bruttoinlands-Produkt 2018 für Deutschland. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 15. Januar 2019 in Berlin. Berlin, 2019.
- [6] **Pro Mobilität:** Höhe der Investitionen des Bundes in die verschiedenen Verkehrswege in Deutschland im Jahr 2018. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/73652/umfrage/hoehe-der-investitionen-in-verschiedene-verkehrswege-in-deutschland/>, 2019.
- [7] **Nobis, C., Kuhnumhof, T.:** Mobilität in Deutschland - MID Ergebnisbericht, Bonn, Berlin, 2018.
- [8] **Deutscher Ausschuss für Stahlbeton:** DAfStb-Richtlinie - Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Berlin: Beuth, 2001.
- [9] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung). Teil 1 - Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung, Berlin: Beuth, 2020.
- [10] **Dauberschmidt, C.:** Chloridbelasteter Beton – immer ein Entsorgungsfall? Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. Regionaltagung Bauausführung. München, 2010.
- [11] **DIN 50919:2016-02:** Korrosion der Metalle - Korrosionsuntersuchungen der Bimetallkorrosion in Elektrolytlösungen, Berlin: Beuth, 2016.
- [12] **Bazant, Z. P.:** Physikal Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures - Theory. Journal of the Structural Division 105, S. 1137–1153, 1979.
- [13] **Raupach, M.:** Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 433, Dissertation, Berlin: Beuth, 1992.
- [14] **Harnisch, J.:** Zum zeitabhängigen Verhalten elektrochemischer und morphologischer Kenngrößen bei der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton, Dissertation, Aachen, 2012.
- [15] **Sagüés, A. A., Kranc, S. C., Moreno, E. I.:** Evaluation of electrochemical impedance with constant phase angle component from the galvanostatic step response of steel in concrete. Electrochimica Acta 41, S. 1239–1243, 1996.

- [16] **Breit, W., Dauberschmidt, C., Becker, F., Celebi, A.:** Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsprinzips W-CI. Abschlussbericht DFG Forschungsprojekt BR4026/3-1, DA 1325/2-1, Kaiserslautern, München, 2019.
- [17] **DIN 1504-9:2008-11:** Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen, (EN 1504-9:2008). Berlin: Beuth, 2008.
- [18] **DIN EN 206:2021-06:** Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. (EN 206:2013+A2:2021), Berlin: Beuth, 2021.
- [19] **Breit, W.:** Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton, Dissertation, Aachen, 1997.
- [20] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung). Teil 2 – Merkmale von Produkten oder Systemen für die Instandsetzung und Regelungen für deren Verwendung. Berlin: Beuth, 2020.
- [21] **Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V.:** Hochdruckwasserstrahltechnik im Betonbau, Berlin: Beuth, 1999.
- [22] **Bayerische Bauordnung (BayBo) v. 14.08.2007, GVBI 2007, S. 588, 2007.**
- [23] **Reou, J. S., Ann, K. Y.:** The distribution of hydration products at the steel–concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment. Corrosion Science 52, S. 2197–2205, 2010.
- [24] **Elgebaley, R., Elshazly, Y., Elsalamawy, M.:** Role of cement type on performance change of reinforcing steel due to chloride extraction. Construction and Building Materials 208, S. 444–453, 2019.
- [25] **Chang, J. J.:** Bond degradation due to the desalination process. Construction and Building Materials 17, S. 281–287, 2003.
- [26] **Schneck, U.:** Zerstörungsfreier elektrochemischer Chloridentzug an der Donaubrücke Pfaffenstein: Langzeiterfahrungen über eine bauwerksschonende und verkehrserhaltende Technologie. Beton- und Stahlbetonbau 104, S. 145–153, 2009.
- [27] **DIN EN ISO 12696:2017:** Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton. (EN ISO 12696:2016). Berlin: Beuth, 2017.
- [28] **Pourbaix, M.:** Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Houston, Tex.: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- [29] **Eichler, T.:** Zu den sekundären Schutzmechanismen beim kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in alkalischen Medien, Dissertation, Aachen, 2012.
- [30] **Mayer, T. F., Harnisch, J., Ebell, G., Dauberschmidt, C.:** Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 113, S. 632–639, 2018.

- [31] **Mietz, J., Fischer, J., Isecke, B.:** Langzeiterfahrungen mit einem kathodischen Korrosionsschutzsystem für Stahl in Beton. *Materials and Corrosion* 52, S. 920–930, 2001.
- [32] **Raupach, M., Bruns, M., Harnisch, J.:** Instandsetzungsprinzip W-Cl nach RL-SIB für die Anwendung bei chloridcontaminierten Parkdecks. Untersuchungen zur Höhe des Chloridgehalts der im Beton verbleiben darf. Abschlussbericht F 889, 2009.
- [33] **Raupach, M.:** Prinzip W bei Chloridangriff. *Beton* 10, S. 380–383, 2017.
- [34] **Schießl, P., Breit, W., Raupach, M.:** Investigations Into the Effect of Coatings on Water Distribution in Concrete Using Multiring Electrodes. *ACI Symposium Publication* 151, S. 119–133, 1993.
- [35] **Andrade, C., Alonso, C.:** Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials* 10, S. 315–328, 1996.
- [36] **Lay, S., Brandes Christian, Rucker-Gramm, P.:** Praxisbericht zum Korrosionsmonitoring in Rissen mit Behandlung nach dem Prinzip W-Cl: 5. Kolloquium Verkehrsbauten - Schwerpunkt Parkbauten, Technische Akademie Esslingen, 2009.
- [37] **Brem, M.:** Numerische Modellierung der Korrosion in Stahlbetonbauten. Anwendung der Boundary Element Methode, Dissertation, Zürich, 2004.
- [38] **Keßler, S., Hiemer, F., Gehlen, C.:** Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem Stahlbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), S. 198–206, 2017.
- [39] **Hiemer, F., Jakob, D., Keßler, S., Gehlen, C.:** Chloride induced reinforcement corrosion in cracked and coated concrete: From experimental studies to time-dependent numerical modeling. *Materials and Corrosion* 69, S. 1526–1538, 2018.
- [40] **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. *Bautechnik* 97, S. 2–10, 2020.
- [41] **Orlowsky, J.:** Zur Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen für die Erhaltung von Betonbauwerken, Habilitationsschrift, Aachen, 2012.
- [42] **Schießl-Pecka, A., Rausch, A., Zintel, M., Linden, C.:** Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 114, S. 767–775, 2019.
- [43] **Klopfer, H.:** Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen. Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1972. Wiesbaden: Bauverl., 1974.
- [44] **DIN EN ISO 7783:2019-02:** Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Schalenverfahren. EN ISO 7783:2018. Berlin: Beuth, 2019.

- [45] **DIN 1504-2:2004**: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung - Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton. Berlin: Beuth, 2005.
- [46] **Weydert, R.**: Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Instandsetzungsprinzip W bei Korrosion infolge Karbonatisierung des Betons. *Materials and Corrosion*, S. 447–453, 2003.
- [47] **Motzke, G.**: Parkhäuser und Tiefgaragen. *Beton- und Stahlbetonbau* 107, S. 579–589, 2012.
- [48] **Schubert, M., Dauberschmidt, C., Eltschig, C., Nechvatal, D., Rapolder, M., Schedl, T.**: Untersuchungen zu Herstellungs- und Instandhaltungskosten von unterschiedlichen Konzepten zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Parkbauten. *Beton- und Stahlbetonbau* 111, S. 564–575, 2016.
- [49] **Köchling, C.**: Die Instandsetzung von Tiefgaragen im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und aktueller Regelwerkdiskussion. - Risiken und Chancen für Bauherr, Planer und Ausführende. In: Gieler-Breßmer, S. (Hg.): 9. Kolloquium Parkbauten; Parkbauten; Planung, Gestaltung, Bau, Instandhaltung, Instandsetzung, Betrieb von Parkhäusern und Tiefgaragen. Tübingen: expert verlag GmbH, S. 71–89, 2020.
- [50] **Celebi, A. R.**: Chloridumverteilung in Beton nach Applikation eines Oberflächenschutzsystems. Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsverfahrens 7.7. Dissertation. Kaiserslautern, 2020.
- [51] **Stark, J., Wicht, B.**: Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser Basel, 2000.
- [52] **Lutze, D., Vom Berg, W., Benschmidt, N. (Hg.)**: Handbuch Flugasche im Beton. Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2008.
- [53] **Garrecht, H.**: Porenstrukturmodelle zum Feuchteverhalten von Baustoffen. In: Wittmann, F. H. (Hg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. *Materials Science*. Teil 1. Tübingen: expert verlag GmbH, S. 12–35, 1992.
- [54] **Rucker-Gramm, P.**: Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen. Dissertation. München, 2008.
- [55] **Thomson, W.**: LX. On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 42, S. 448–452, 1871.
- [56] **Powles, J. G.**: On the validity of the Kelvin equation. *Journal of Physics A: Mathematical and General* 18, S. 1551–1560, 1985.
- [57] **Wiegrink, K.-H.**: Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen. Dissertation. München, 2002.

- [58] **Rose, D. A.:** Water movement in porous materials: Part 2 - The separation of the components of water movement. *British Journal of Applied Physics* 14, S. 491–496, 1963.
- [59] **Meng, B.:** Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen - Analyse der Zusammenhänge zwischen Porenstruktur und Feuchtehaushalt am Beispiel von Sandstein, 1993.
- [60] **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.
- [61] **Fagerlund, G.:** A service life model for internal frost damage in concrete. Report TVBM; Vol 3119. Schweden: Division of Building Materials, LTH, Lund University, 2004.
- [62] **Kießl, K.:** Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikal. Anwendung. Essen, Univ., FB Bauwesen, Diss., 1983.
- [63] **Kast, W., Jokisch, F.:** Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen und zur Sorptionskinetik an porösen Feststoffen. *Chemie Ingenieur Technik* 44, S. 556–563, 1972.
- [64] **Mualem, Y.:** A conceptual model of hysteresis. *Water Resources Research* 10, S. 514–520, 1974.
- [65] **Mualem, Y., Miller, E. E.:** A Hysteresis Model Based on an Explicit Domain-Dependence Function<sup>1</sup>. *Soil Science Society of America Journal* 43, S. 1067–1073, 1979.
- [66] **Espinosa, R. M., Franke, L.:** Inkbottle Pore-Method: Prediction of hygroscopic water content in hardened cement paste at variable climatic conditions. *Cement and concrete research* 36, S. 1954–1968, 2006.
- [67] **Everett, D. H., Haynes, J. M.:** Model studies of capillary condensation. I. Cylindrical pore model with zero contact angle. *Journal of Colloid and Interface Science* 38 (1972), S. 125–137, 1972.
- [68] **Mason, G.:** The effect of pore space connectivity on the hysteresis of capillary condensation in adsorption—desorption isotherms. *Journal of Colloid and Interface Science* 88, S. 36–46, 1982.
- [69] **Künzel, H. M.:** Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Stuttgart, 1994.
- [70] **Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E.:** Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society* 60 (1938), S. 309–319, 1938.

- [71] **Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., Teller, E.:** On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of the American Chemical Society* 62, S. 1723–1732, 1940.
- [72] **Häupl, P., Höfker, G., Homann, M., Kölzow, C., Maas, A., Nocke, C., Riese, O.:** Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [73] **Heintz, A.:** Thermodynamik der Mischungen und Mischphasengleichgewichte. In: Heintz, A. (Hg.): *Thermodynamik der Mischungen: Mischphasen, Grenzflächen, Reaktionen, Elektrochemie, äußere Kraftfelder*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–195, 2017.
- [74] **Steffens, A.:** Modellierung von Karbonatisierung und Chloridbindung zur numerischen Analyse der Korrosionsgefährdung der Betonbewehrung. Dissertation. Braunschweig, 2000.
- [75] **Larsen, P.:** Desalination of painted brick vaults. Dissertation. Denmark 1999.
- [76] **Tang, L.:** Chloride Transport in Concrete. Measurement and Prediction. Dissertation. Göteborg, 1996.
- [77] **Volkwein, A.:** Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Dissertation. München, 1991.
- [78] **Gehlen, C.:** Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin: Beuth, 2000.
- [79] **Brodersen, H. A.:** Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation. Aachen, 1982.
- [80] **Rahimi, A.:** Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. Dissertation, 2016.
- [81] **Climent, M. A., de Vera, G., López, J. F., Andrade, C., Viqueira, E.:** A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete: Part I. The instantaneous plane source diffusion case. *Cement and concrete research* 32 (2002), S. 1113–1123, 2002.
- [82] **Zhang, Y., Zhang, M.:** Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review. *Construction and Building Materials* 72, S. 367–379, 2014.
- [83] **Saetta, A. V., Scotta, R. V., Vitaliani, R. V.:** Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. *ACI Materials Journal* 90, 1993.
- [84] **Epstein, N.:** On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media. *Chemical Engineering Science* 44, S. 777–779, 1989.
- [85] **Lay, S.:** Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion Baustein eines Systems zum



- Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken. Dissertation. München, 2005.
- [86] **Wiens, U.:** Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbetonbau, Heft 551, Dissertation. Berlin: Beuth, 2005.
- [87] **Celebi, A., Breit, W.:** Investigation on the effectiveness of the repair method 8.3 "Corrosion protection by increasing the electrical resistivity" in chloride-containing concrete Part 2: Chloride redistribution in concrete after application of a system sealing surface protective coating. *Materials and Corrosion* 71, S. 707-715, 2020.
- [88] **Reichling, K.:** Bestimmung und Bewertung des elektrischen Widerstands von Beton mit geophysikalischen Verfahren. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 612, Dissertation. Berlin: Beuth, 2015.
- [89] **Milazzo, G.:** Die Elektrolyte und die elektrische Leitfähigkeit. In: Milazzo, G. (Hg.): *Elektrochemie: Theoretische Grundlagen und Anwendungen*. Vienna: Springer Vienna, S. 17–67, 1980.
- [90] **Job, G., Rüffler, R.:** Elektrolytlösungen. In: Job, G., Rüffler, R. (Hg.): *Physikalische Chemie: Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, S. 450–474, 2011.
- [91] **Washa, G. W., Saemann, J. C., Cramer, S. M.:** Fifty-year properties of concrete made in 1937. *ACI Materials Journal* 86, S. 367–371, 1975.
- [92] **Walz, K.:** Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren. *Beton* 26, S. 95–98, 1976.
- [93] **Archie, G. E.:** The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME* 146, S. 54–62, 1942.
- [94] **Gunkel, P.:** Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente. *Beton-Information* 1, S. 3–8, 1983.
- [95] **Osterminski, K.:** Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton. Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen. Dissertation. München, 2013.
- [96] **Bürchler, D.:** Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen Modell, Einflussgrößen und Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton. Dissertation. Zürich, 1996.
- [97] **Arrhenius, S.:** Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 4, S. 226–248, 1889.
- [98] **Cox, R. N.:** Corrosion and protection of metals in contact with concrete. Final report: European Commission, 1997.
- [99] **Andrade, C., Alonso, C.:** On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, S. 141–145, 2001.

- [100] **Andrade, C., Alonso, C.:** Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures* 37, S. 623–643, 2004.
- [101] **Hornbostel, K., Larsen, C. K., Geiker, M. R.:** Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. *Cement & Concrete Composites* 39, S. 60–72, 2013.
- [102] **The European Union – Brite EuRam III:** DuraCrete, Final Technical Report. DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R17, 2000.
- [103] **Alonso, C., Andrade, C., González, J. A.:** Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cement and concrete research* 18, S. 687–698, 1988.
- [104] **Warkus, J., Raupach, M.:** Modelling of reinforcement corrosion – geometrical effects on macrocell corrosion. *Materials and Corrosion* 61, S. 494–504, 2010.
- [105] **Warkus, J.:** Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton bei Makroelementbildung. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 610, Dissertation. Berlin: Beuth, 2014.
- [106] **Hornbostel, K., Angst, U. M., Elsener, B., Larsen, C. K., Geiker, M. R.:** Influence of mortar resistivity on the rate-limiting step of chloride-induced macro-cell corrosion of reinforcing steel. *Corrosion Science* 110, S. 46–56, 2016.
- [107] **Hornbostel, K., Elsener, B., Angst, U. M., Larsen, C. K., Geiker, M. R.:** Limitations of the use of concrete bulk resistivity as an indicator for the rate of chloride-induced macro-cell corrosion. *Structural Concrete* 18, S. 326–333, 2017.
- [108] **DIN EN ISO 8044:2020-08:** Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe. (EN ISO 8044 : 2015). Berlin: Beuth, 2020.
- [109] **Kaesche, H.:** Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. Heidelberg: Springer, 2011.
- [110] **Rahmel, A., Schwenk, W.:** Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen. Weinheim, New York: Verlag Chemie, 1977.
- [111] **Poursaeed, A., Hansson, C. M.:** Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. *Cement and concrete research* 37, S. 1127–1133, 2007.
- [112] **Strehblow, H.-H.:** Breakdown of passivity and localized corrosion: Theoretical concepts and fundamental experimental results. *Materials and Corrosion* 35, S. 437–448, 1984.
- [113] **Stark, J., Wicht, B.:** Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.

- [114] **Dauberschmidt, C.:** Untersuchungen zu den Korrosionsmechanismen von Stahlfasern in chloridhaltigem Beton. Dissertation. Aachen, 2006.
- [115] **Pruckner, F.:** Corrosion and protection of reinforcement in concrete – Measurements and interpretation. Dissertation. Universität Wien, 2001.
- [116] **Murphy, O. J.:** Spectroscopic Characterization of the Passive Film on Iron before and after Exposure to Chloride Ion. In: Murphy, O. J., Srinivasan, S., Conway, B. E. (Hg.): *Electrochemistry in Transition: From the 20th to the 21st Century*. Boston, MA: Springer US, S. 521–545, 1992.
- [117] **Pourbaix, M.:** Bestimmung und Anwendung von Gleichgewichtspotentialen. *Materials and Corrosion* 20, S. 772–784, 1969.
- [118] **Schießl, 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.
- [119] **Costa, A., Appleton, J.:** Chloride penetration into concrete in marine environment-Part II: Prediction of long term chloride penetration. *Materials and Structures* 32, S. 354–359, 1999.
- [120] **Bamforth, P. B.:** The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials. *Magazine of Concrete Research* 51, S. 87–96, 1999.
- [121] **Harnisch, J., Raupach, M.:** Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt unter Berücksichtigung der Kontaktzone zwischen Stahl und Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 106, S. 299–307, 2011.
- [122] **Breit, W., Dauberschmidt, C., Gehlen, C., Sodeikat, C., Taffe, A., Wiens, U.:** Zum Ansatz eines kritischen Chloridgehaltes bei Stahlbetonbauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 106, S. 290–298, 2011.
- [123] **Gonzalez, J. A., Algaba, J. S., Andrade, C.:** Corrosion of Reinforcing Bars in Carbonated Concrete. *British Corrosion Journal* 15, S. 135–139, 1980.
- [124] **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. *Materials and Structures* 50, S. 1–24, 2017.
- [125] **Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., Vennesland, Ø.:** Chloride induced reinforcement corrosion: Rate limiting step of early pitting corrosion. *Electrochimica Acta* 56, S. 5877–5889, 2011.
- [126] **Beck, M. F.:** Zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton. Dissertation. Aachen, 2010.
- [127] **Poursaee, A., Laurent, A., Hansson, C. M.:** Corrosion of steel bars in OPC mortar exposed to NaCl, MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub>: Macro- and micro-cell corrosion perspective. *Cement and concrete research* 40, S. 426–430, 2010.

- [128] **Stern, M., Geary, A. L.:** Electrochemical Polarization. *Journal of The Electrochemical Society* 104, S. 56, 1957.
- [129] **Schießl, P., Raupach, M.:** Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structures. *Concrete International* 14, 1992.
- [130] **Raupach, M., Schießl, P.:** Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures. *NDT & E International* 34, S. 435–442, 2001.
- [131] **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. Berlin: Beuth 2008.
- [132] **DIN ISO 15901-1:2019-3:** Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie. (ISO 15901-1:2019-03). Berlin: Beuth 2019.
- [133] **Weydert, R.:** Randbedingungen bei der Instandsetzung nach dem Schutzprinzip W bei Bewehrungskorrosion im karbonatisierten Beton. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbetonbau, Heft 552, Dissertation. Berlin: Beuth, 2005.
- [134] **DIN 12571:2013-12:** Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. (EN ISO 12571:2013). Berlin: Beuth, 2013.
- [135] **Raupach, M., Dauberschmidt, C., Wolff, L., Harnisch, J.:** Monitoring der Feuchteverteilung in Beton. Sensorik und Anwendungsmöglichkeiten. *Beton* 57, S. 20–26, 2007.
- [136] **Pawlick, L. A., Stoner, G. E., Clemena, G. G.:** Development of an embeddable reference electrode. Final Contract Report 198. Charlottesville, Virginia, 1998.
- [137] **Castro, P., Sagüés, A. A., Moreno, E. I., Maldonado, L., Genescá, J.:** Characterization of Activated Titanium Solid Reference Electrodes for Corrosion Testing of Steel in Concrete. *Corrosion* 52, S. 609–617, 1996.
- [138] **Ge, J., Isgor, O. B.:** Effects of Tafel slope, exchange current density and electrode potential on the corrosion of steel in concrete. *Materials and Corrosion* 58, S. 573–582, 2007.
- [139] **Bertolini, L., Elsener, B., Pedefferri, P., Redaelli, E., Polder, R. B.:** Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair. Weinheim: Wiley, 2013.
- [140] **Raupach, M., Gulikers, J.:** Zum Einfluss der kathodischen Reaktion auf die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. *Materials and Corrosion* 52, S. 766–770, 2001.
- [141] **DIN 50918:2018-09:** Korrosion der Metalle — Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen. Berlin: Beuth, 2018.

- [142] **Angst, U., Büchler, M.:** On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. *Materials and Corrosion* 66, S. 1017–1028, 2015.
- [143] **Heitz, E., Schwenk, W.:** Theoretische Grundlagen der Ermittlung von Korrosionsstromdichten aus Polarisationswiderständen. *Materials and Corrosion* 27, S. 241–245, 1976.
- [144] **Raistrick, I. D., Franceschetti, D. R., Macdonald, J. R.:** Theory. 2: Impedance Spectroscopy: John Wiley & Sons, Ltd, S. 27–128, 2018.
- [145] **Gabrielli, C., Keddah, M.:** Contribution of electrochemical impedance spectroscopy to the investigation of the electrochemical kinetics. *Electrochimica Acta* 41, S. 957–965, 1996.
- [146] **Boukamp, B. A.:** A Linear Kronig-Kramers Transform Test for Immittance Data Validation. *Journal of The Electrochemical Society* 142, S. 1885–1894, 1995.
- [147] **Kelly, R. G., Scully, J. R., Shoesmith, D. W., Buchheit, R. G.:** Electrochemical techniques in corrosion science and engineering. New York, NY: Dekker 2003.
- [148] **Arpaia, M., Pernice, P., Costantini, A.:** A low frequency impedance study of steel/concrete interface. *Materials Chemistry and Physics* 24, S. 525–534, 1990.
- [149] **Sagues, A., Kranc, S., Moreno, E.:** The time-domain response of a corroding system with constant phase angle interfacial component: Application to steel in concrete. *Corrosion Science* 37, S. 1097–1113, 1995.
- [150] **Ochs, H.:** Physikalisch-chemische Untersuchungen von Grenzschichten auf metallischem Untergrund. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2003.
- [151] **Feliu, V., González, J. A., Andrade, C., Feliu, S.:** Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. II. Complications in applying the stern-geary equation to corrosion rate determinations. *Corrosion Science* 40 (1998), S. 995–1006, 1998.
- [152] **Feliu, V., González, J., Andrade, C., Feliu, S.:** Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. I. experimental evidence and theoretical predictions. *Corrosion Science* 40 (1998), S. 975–993, 1998.
- [153] **Eichler, T., Isecke, B., Bäßler, R.:** Investigations on the re-passivation of carbon steel in chloride containing concrete in consequence of cathodic polarisation. *Materials and Corrosion* 60, S. 119–129, 2009.
- [154] **Wei, J., Fu, X. X., Dong, J. H., Ke, W.:** Corrosion Evolution of Reinforcing Steel in Concrete under Dry/Wet Cyclic Conditions Contaminated with Chloride. *Journal of Materials Science & Technology* 28, S. 905–912, 2012.
- [155] **DIN 50905-1:2009-09:** Korrosion der Metalle - Korrosionsuntersuchungen - Teil 1: Grundsätze. Berlin: Beuth, 2009.

- [156] **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. *Materials and Corrosion* 71, S. 716–725, 2020.
- [157] **Dauberschmidt, C., Breit, W., Becker, F., Celebi, A.:** Instandsetzung von chloridbelasteten Bauteilen durch Applikation einer Beschichtung. Untersuchungen zu den Anwendungsgrenzen der Verfahren 7.7 und 8.3. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2021.
- [158] **Kapteina, G.:** Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken. Dissertation. München, 2011.
- [159] **Wittmann, F. H.:** Porosität und Feuchtigkeitsgehalt. WTA-Schriftenreihe, Nr. 3. WTA- Schriftenreihe, S. 1–22, 1992.
- [160] **Zhang, Y., Zhang, M., Ye, G.:** Influence of moisture condition on chloride diffusion in partially saturated ordinary Portland cement mortar. *Materials and Structures* 51, S. 36, 2018.
- [161] **Zhang, Z., Thiéry, M., Baroghel-Bouny, V.:** A review and statistical study of existing hysteresis models for cementitious materials. *Cement and concrete research* 57, S. 44–60, 2014.
- [162] **Hope, B. B., Ip, A. K.:** Chloride Corrosion Threshold in Concrete. *ACI Materials Journal* 84, 1981.
- [163] **Bürchler, D., Elsener, B., Böhni, H.:** Electrical Resistivity and Dielectric Properties of Hardened Cement Paste and Mortar. *MRS Proceedings* 411, 1995.
- [164] **Visser, J.:** Statistical quantification of the variables in the limit state functions. DuraCrete, probabilistic performance based durability design of concrete structures. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R9, 2000.
- [165] **Schnell, J., Raupach, M.:** Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt. Positionspapier des DAfStb zum aktuellen Stand der Technik, 2015.
- [166] Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen sowie über die Zahl der notwendigen Stellplätze. Garagen- und Stellplatzverordnung – GaStellV: BayRS 2132-1-4-B.

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Geschätzter jährlicher Instandsetzungsbedarf zur Beseitigung der Korrosionsschäden an Ingenieurbauwerken in Deutschland nach Daten von [5; 6] und eigener Berechnung.....	2
Abbildung 2-1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur Beschreibung des Korrosionssystems Stahl in Beton mit den elektrochemischen Prozessen bei einer lokalen Auflösung der Passivschicht z. B. durch Chloride [Eigene Darstellung in Anlehnung an [12–14]] .....	5
Abbildung 2-2: Ablaufschema der Arbeit mit Gliederung und den Teilaspekten der Fragestellung .....	7
Abbildung 3-1: Entwicklung des Bauwerkszustands über die Lebensdauer in Anlehnung an [17] .....	8
Abbildung 3-2: Zuordnung der Instandsetzungsprinzipien für chloridbelasteten Beton entsprechend der Schutzwirkung in Anlehnung an die Regelwerke [8; 9; 17] .....	9
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung Verfahren 7.2 nach TR Instandhaltung [9] .....	10
Abbildung 3-4: Abstützmaßnahmen und Betonabtrag bei Stützeinstandsetzung mittels Verfahren R-Cl bzw. Verfahren 7.2; Bild: id+v, Rommel .....	11
Abbildung 3-5: Einbau Bandanoden bei Tiefgarageninstandsetzung mittels Instandsetzungsprinzip KKS bzw. Verfahren 10.1, Bild: id+v, Becker .....	13
Abbildung 3-6: Schematische Darstellung Verfahren 10.1 in Anlehnung an die Darstellungsform in [9] .....	13
Abbildung 3-7: Einfluss der Luftfeuchte auf die anodische Stromdichte-Potentialkurve von Stahl in chloridhaltigem Mörtel (logarithmische Skalierung) [37] .....	16
Abbildung 3-8: Schematische Darstellung Verfahren 8.3 nach [9] .....	17
Abbildung 3-9: Kostenvergleich von Instandsetzungsprinzipien anhand eines Fallbeispiels .....	22
Abbildung 4-1: CSH-Phasen eines CEM I-Betons mit einem w/z-Wert von 0,5 (eigene Darstellung) .....	24
Abbildung 4-2: Unterschiedliche Porenfüllgrade und Feuchtetransport in vier Phasen nach Rose [58] .....	26
Abbildung 4-3: Darstellung von Sorptionsisothermen schematisch, in Anlehnung an [60–62] .....	27

Abbildung 4-4: Einfluss von wasserlöslichen Salzen auf den Verlauf von Speicherisothermen bei porösen Baustoffen in Anlehnung an [71] .....	28
Abbildung 4-5: Feuchtespeicherfunktion für Beton in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und dem Salzgehalt [73] .....	29
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des Transportweges durch ein gesättigtes Porensystem und durch ein teilwassergesättigtes Porensystem .....	30
Abbildung 4-7: Zeitliche Entwicklung des spezifischen Widerstands von wassergesättigten Betonen unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung aus [94].....	33
Abbildung 4-8: Einfluss von Polarisationswiderständen und spezifischen Elektrolytwiderständen auf die Elementstromdichte bei einer Treibspannung von 400 mV und einer parallelen Anoden-/Kathodenanordnung im Verhältnis 1:1 [105] .....	36
Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen gemessener Korrosionsstromdichte und spezifischem Widerstand mit Darstellung der Regression nach Brem [36] und Andrade [100] .....	37
Abbildung 4-10: Schematischer Schadensverlauf eines Stahlbetonbauteils infolge Korrosion nach [1] und [77].....	38
Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der möglichen Startvorgänge der Lochkorrosion nach [112].....	40
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung Prüfkörper „W-Cl-Single“ .....	44
Abbildung 5-2: Anodenleiter für den chloridhaltigen Beton mit den Edelstahlanoden sowie den Stahlanoden (links); Anordnung der Elektrodenleiter in der Schalungsbatterie für chloridfreien Beton mit der Quasireferenzelektrode (QRE) und dem Zugang für die Ankopplung einer Referenzelektrode (rechts) .....	45
Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Elektrodenanordnung im Multifunktionsprüfkörper „W-Cl-Multi“ und Umsetzung im Labor ....	45
Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der „W-Cl-Plus“-Probekörper .....	46
Abbildung 5-5: Schematische Messanordnung des Elektrolytwiderstands an der Probenserie „W-Cl-Single“ .....	51
Abbildung 5-6: Schematische Messanordnung zur Bestimmung der Elektrolytwiderstände an der Probenserie „W-Cl-Multi“ .....	52
Abbildung 5-7: Schematische Messanordnung zur Bestimmung des freien Korrosionspotentials.....	53
Abbildung 5-8: Schematische Messanordnung der Korrosionsstrommessung .....	54



Abbildung 5-9: Prinzip der Elementstrombestimmung an der mit der Titanmischoxid-Kathode (TMMO) kurzgeschlossenen Anode in einer ZRA (Zero Resistance Amperemeter)-Messung.....	55
Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der potentiostatischen Arbeitsweise bei der Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands .....	56
Abbildung 5-11: Exemplarische Darstellung der Bestimmung des Polarisationswiderstands am freien Korrosionspotential .....	56
Abbildung 5-12: Schematische Darstellung des Messaufbaus bei der EIS-Messung an der Probenserie „W-Cl-Plus“ .....	57
Abbildung 5-13: Ergebnisse einer EIS-Messung an Stahlbeton im Bode-Diagramm (links) und im Nyqvist-Diagramm (rechts) .....	58
Abbildung 5-14: Schematische Darstellung der Randles-Zelle und dazugehöriges Bode-Diagramm.....	59
Abbildung 5-15: Im Rahmen der Arbeit verwendete Ersatzschaltbilder für das untersuchte Korrosionssystem Stahl und Beton für passive und aktive Bewehrung.....	61
Abbildung 5-16: Analyse und Quantifizierung der korrosionsgeschädigten Flächenanteile der ausgebauten Stahlanoden .....	62
Abbildung 6-1: Ergebnisse der Desorptionsmessungen an Probekörpern mit CEM I (links) und CEM III (rechts), $w/z = 0,5$ und $0 \text{ M.-% Cl/z}$ .....	64
Abbildung 6-2: Vergleich der Sorptionsisotherme in Abhängigkeit der Zementart CEM I und CEM III; $w/z = 0,5$ .....	65
Abbildung 6-3: Vergleich der Sorptionsisotherme in Abhängigkeit von der Zementart CEM I und CEM III A; $w/z = 0,6$ .....	66
Abbildung 6-4: Vergleich der Sorptionsisothermen in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert an CEM I-Beton ohne Chlorid .....	66
Abbildung 6-5: Sorptionsisotherme CEM I, $w/z = 0,5$ bei $0 \text{ M.-% Cl/z}$ und $2 \text{ M.-% Cl/z}$ .....	67
Abbildung 6-6: Sorptionsisotherme CEM I, $w/z = 0,5$ bei $0 \text{ M.-% Cl/z}$ und $4 \text{ M.-% Cl/z}$ .....	68
Abbildung 6-7: Sorptionsisotherme CEM III, $w/z = 0,5$ bei $0 \text{ M.-% Cl/z}$ und $4 \text{ M.-% Cl/z}$ .....	69
Abbildung 6-8: Spezifische Elektrolytwiderstände der Betone aus Tabelle 5.2 nach 91 Tagen und Wassersättigung der Probekörper. Graue Balken: Ergebnisse nach 28 Tagen aus [94].....	71
Abbildung 6-9: Ergebnisse der Messung des spezifischen Widerstands bei der Desorption mit CEM I (links) und CEM III (rechts), $w/z = 0,5$ und $0 \text{ M.-% Cl/z}$ .....	72

Abbildung 6-10: Einfluss der Luftfeuchte auf den spezifischen Elektrolytwiderstand der untersuchten Betone mit einem Vergleich aus Osterminski [94] und Visser [164] .....	73
Abbildung 6-11: Korrelation zwischen spezifischem Elektrolytwiderstand und dem ermittelten Wassergehalt des Betons .....	74
Abbildung 6-12: Einfluss des Chloridgehalts bei CEM I-Beton auf den spezifischen Elektrolytwiderstand (links) und faktorielle Darstellung des Einflusses des Chloridgehalts bei 75 % r. F. (rechts) .....	75
Abbildung 6-13: Ergebnisse der Messung des spezifischen Widerstands bei der Adsorption mit CEM I (links) und CEM III (rechts), $w/z = 0,5$ und $0 \text{ M.-% Cl}^-/z$ .....	76
Abbildung 6-14: Ergebnisse der Messung des spezifischen Widerstands bei der Adsorption für einen CEM I Beton mit einem $w/z$ -Wert von $0,5$ mit $2 \text{ M.-% Cl}^-/z$ (links) und $4 \text{ M.-% Cl}^-/z$ (rechts) .....	77
Abbildung 6-15: Faktorielle Darstellung des Hysterese-Einflusses auf den spezifischen Elektrolytwiderstand .....	78
Abbildung 6-16: Entwicklung des tiefengestaffelten Elektrolytwiderstands über die Auslagerungsdauer der unbeschichteten Referenzproben CEM I, $w/z = 0,5$ und $\text{Cl}^- = 2 \text{ M.-%}/z$ .....	79
Abbildung 6-17: Vergleich der spezifischen Elektrolytwiderstände „W-Cl-Single“ und „W-Cl-Multi“ der unbeschichteten Referenzproben CEM I und CEM III, $w/z = 0,5$ und $\text{Cl}^- = 2 \text{ M.-%}/z$ bei Ausgleichsfeuchte .....	80
Abbildung 6-18: Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM I, $w/z = 0,50$ , $2 \text{ M.-% Cl}^-/z$ in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	80
Abbildung 6-19: Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM III, $w/z = 0,50$ , $2 \text{ M.-% Cl}^-/z$ in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	81
Abbildung 6-20: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Elektrolytwiderstände zu Beginn der Auslagerung im Laborklima nach Feuchtelagerung (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	82
Abbildung 6-21: Zeitliche Entwicklung der freien Korrosionspotentiale vs. SHE über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM I, $w/z = 0,50$ , $2 \text{ M.-% Cl}^-/z$ in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	85

---

Abbildung 6-22: Zeitliche Entwicklung der freien Korrosionspotentiale vs. SHE über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM III, $w/z = 0,50$ , 2 M.-% $Cl^-/z$ in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	86
Abbildung 6-23: Darstellung des freien Korrosionspotentials zu Beginn der Auslagerung im Laborklima nach Feuchtelagerung (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	87
Abbildung 6-24: Entwicklung der Korrosionsstromdichten über den Untersuchungszeitraum exemplarisch für CEM I, $w/z = 0,50$ , 2 M.-% $Cl^-/z$ in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte [156] .....	88
Abbildung 6-25: Entwicklung der Korrosionsstromdichten zu Beginn der Auslagerung im Laborklima nach Feuchtelagerung (90 d) und zu Ende des Untersuchungszeitraums (450 d) in Abhängigkeit von der applizierten Beschichtung und der Luftfeuchte .....	89
Abbildung 6-26: Korrelation der ermittelten spezifischen Elektrolytwiderstände und der Korrosionsstromdichte zum Ende des Untersuchungszeitraums.....	90
Abbildung 6-27: Doppellogarithmische Darstellung der zum Ende der Auslagerung gemessenen spezifischen Elektrolytwiderstände und der Korrosionsstromdichten mit Vergleichswerten und Auswertung aus [32; 36; 107].....	91
Abbildung 6-28: Exemplarische Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands an einer feuchtgelagerten Referenzprobe CEM I, $w/z = 0,5$ % $Cl^-$ 2 M.-%/z.....	92
Abbildung 6-29: Entwicklung des Polarisationswiderstands der Referenzproben bei Austrocknung.....	93
Abbildung 6-30: Exemplarische Auswertung einer EIS Messung an einem CEM I-Beton mit einem Chloridgehalt von 4 M.-%/z bei einer Lagerungsfeuchte von 55 % r. F. links: Bode-Diagramm; rechts: Nyquist-Diagramm mit verwendetem Ersatzschaltbild.....	94
Abbildung 6-31: Vergleich des Einflusses des Chloridgehalts auf die Ergebnisse der EIS-Messung; Links: CEM I mit 4 M.-% $Cl^-/z$ ; Rechts: CEM I mit 0 M.-% $Cl^-/z$ ; .....	95
Abbildung 6-32: Kontrollfaktoren des Korrosionszustands für die mittels EIS-Messung untersuchten Zustände des CEM I-Betons .....	96
Abbildung 6-33: Korrosionsprodukte um die Stahlanode (links), ausgebaute Stahlanode nach dem Beizen (rechts) .....	99

Abbildung 7-1: Klimaprofil 1 einer mehrjährigen Messung in einer Tiefgarage in Berlin (Feuchte links, Temperatur rechts) .....	102
Abbildung 7-2: Klimaprofil 2 einer mehrjährigen Messung in einer Tiefgarage in Berlin (Feuchte links, Temperatur rechts) .....	102
Abbildung 7-3: Austrocknungsverhalten eines Stahlbetonbauteils in einer Schichttiefe von 25 mm mit vertikaler Ausrichtung und einer Bauteildicke von 0,50 m über einen Beobachtungszeitraum von fünf Jahren für zwei Feuchteprofile einer Tiefgarage über die Variation der Beschichtungssysteme und des Chloridgehalts.....	103
Abbildung 7-4: Spezifischer Elektrolytwiderstand nach einer Austrocknung von fünf Jahren bei einem anzunehmenden Betonalter von 15 Jahren .....	106
Abbildung 8-1: Entscheidungsbaum für die Anwendung des Instandsetzungsverfahrens 8.3 bei bereits depassivierter Bewehrung im ungerissenen Beton .....	112

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Nach TR-IH zugelassene Oberflächenschutzsysteme für die Instandsetzung nach Verfahren 8.3.....	18
Tabelle 3-2:	Klassen der Wasserdampf-Durchlässigkeit nach [44] und Zuordnung von OS-Systemen nach Untersuchungen von Weydert [45] bzw. gemäß produktspezifischer Herstellerangabe.....	20
Tabelle 4-1:	Korrosionsrisiko in Abhängigkeit vom spezifischen Elektrolytwiderstand und von der Elementstromdichte nach [97–99] .....	34
Tabelle 5-1:	Versuchsreihen und untersuchte Einflussparameter .....	43
Tabelle 5-2:	Untersuchte Betonzusammensetzungen.....	46
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der Betonuntersuchungen .....	47
Tabelle 5-4:	Materialparameter der Beschichtung laut Herstellerangabe.....	47
Tabelle 5-5:	Luftfeuchten zur Ermittlung der Gleichgewichtsfeuchte bei Sorption und Desorption.....	48
Tabelle 5-6:	Variationsparameter zur Bestimmung der Sorptionsisotherme von chloridhaltigem Beton.....	49
Tabelle 5-7:	Korrosionspotentiale von Stahl in Beton.....	53
Tabelle 5-8:	Gebräuchliche Ersatzschaltbilder aus der Literatur für das Korrosionssystem Stahl/Beton .....	59
Tabelle 6-1:	Ergebnisse der ausgewerteten EIS-Messung .....	95
Tabelle 6-2:	Einordnung der Ergebnisse aus der EIS-Messung im Vergleich zur Messung des linearen Polarisationswiderstands und zur Korrosionsstrommessung (ZRA) .....	97
Tabelle 6-3:	Ergebnisse der ermittelten Anodenflächen.....	99
Tabelle 8-1:	Technisches Risiko in Abhängigkeit von den Randbedingungen für das Verfahren 8.3.....	113

## 13 Lebenslauf des Verfassers

### Persönliche Daten

Name: Felix Becker  
Geburtsort: München



---

### Ausbildung

10/2006 – 07/2013	<b>Masterstudiengang Bauingenieurwesen</b> Hochschule München Fachrichtung: Allgemeiner Ingenieurbau
10/2006 – 07/2010	<b>Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen</b> Hochschule München Schwerpunkt: Allgemeines Bauingenieurwesen
10/2004 – 03/2006	<b>Diplomstudiengang Bauingenieurwesen</b> Technische Universität München Ohne Abschluss
09/2002 – 06/2004	<b>Fachgebundene Hochschulreife</b> Städt. Marian-Batko-Berufsoberschule München

---

### Berufspraxis

Seit 08/2021	<b>Stellvertretender Prüfstellenleiter</b> B+P Baustoffprüfung Ingenieurgesellschaft mbH
10/2020 – 08/2021	<b>Projektingenieur</b> B+P Baustoffprüfung Ingenieurgesellschaft mbH
10/2012 - 09/2020	<b>Wissenschaftlicher Mitarbeiter</b> Hochschule München, Fakultät Bauingenieurwesen
10/2010-09/2020	<b>Freier Mitarbeiter</b> Ingenieurgesellschaft Dauberschmidt und Vestner mbH
10/2010 – 09/2012	<b>Laboringenieur</b> Hochschule München, Fakultät Bauingenieurwesen bei Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt
09/1999 – 06/2002	<b>Ausbildung zum Baustoffprüfer</b> Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Universität München (MPA BAU)

**Werkstudentische Tätigkeit**

---

03/2008 – 10/2010

**Studentische Hilfskraft**

Ingenieurbüro Schießl, Gehlen Sodeikat GmbH

---

**Sprachkenntnisse:**

Englisch B2

---

München, 05.04.2022

## Anhang A: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gängiger Instandsetzungsvarianten mit dem Verfahren 8.3

### Allgemeines

Der Kostenvergleich zu unterschiedlichen Instandsetzungsvarianten wird an einer fiktiv konstruierten Tiefgarage durchgeführt.

Abbildung A-1 zeigt den Grundriss und den Schnitt der zweigeschossigen Tiefgarage mit insgesamt 60 Stellplätzen und einer Geschossfläche von rd. 740 m<sup>2</sup>. Der Aufbau orientiert sich an Darstellungen aus [47]. Die Abmessung und Anordnung der Stellplätze sowie die lichte Höhe und das Gefälle der Tiefgarage orientieren sich an den Vorgaben der bayerischen Garagenverordnung [166].

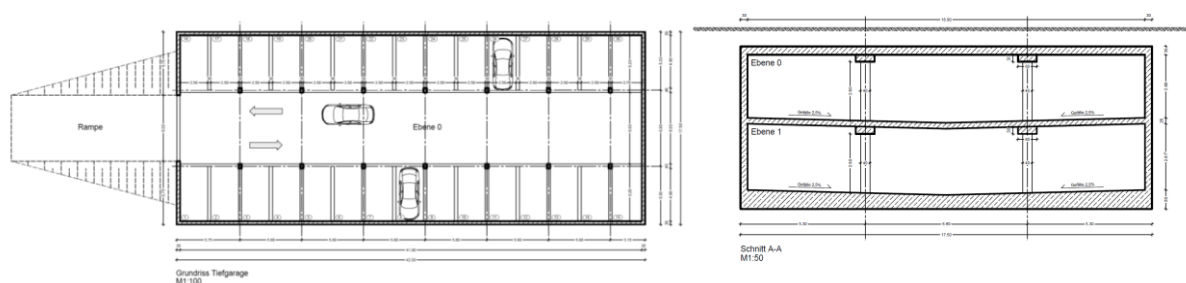


Abbildung A-1: Grundriss und Schnitt der für den Kostenvergleich herangezogenen Tiefgarage

### Randbedingungen und Schadenszenarien

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden Randbedingungen festgelegt, welche bei der Instandsetzungsplanung und bei der Wirkungsweise der Instandsetzungsmaßnahme eine effektive Rolle spielen. Die Randbedingungen wurden dabei so gewählt, dass eine Instandsetzung mittels W-CI/Verfahren 8.3 im Prinzip möglich ist. Hierzu zählen:

- Alter der Tiefgarage zum Instandsetzungszeitpunkt 15 Jahre
- kein anstehendes Grundwasser
- Bitumendickbeschichtung an den erdberührten Bauteilen
- Zwischendecke und Bodenplatte ohne signifikante Rissbildung
- relative Luftfeuchte im Jahresmittel < 60 %

Neben den allgemeinen Randbedingungen ergeben sich auch spezifische Einflüsse, die sich auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Instandsetzungsmaßnahmen auswirken. Maßgeblich ist dabei das Schädigungspotential der Tiefgarage, der sog. Istzustand. Auf der Grundlage des Istzustands werden die verschiedenen Instandsetzungskonzepte geplant. Hieraus ergeben sich die entsprechenden Mengenermittlungen. Maßgeblicher Parameter für die Kategorisierung der Bauteile



im Schadensszenario ist der Chloridgehalt des Stahlbetons auf Höhe der Bewehrung. Aus den fiktiven Chloridgehalten werden drei farblich codierte Schädigungsstufen gebildet, mit denen eine Kategorisierung der Bauteile ermöglicht wird. Tabelle A-1 zeigt die Schädigungsstufe sowie die sich daraus abzuleitenden Auffälligkeiten.

Tabelle A-1: Schädigungsstufen für Charakterisierung des Schädigungspotentials der Tiefgarage im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Schädigungsstufe	1	2	3
Farbschema	Grün	Gelb	Rot
Chloridgehalt Cl <sup>-</sup> [M.-%/z]	< 0,5	0,5 bis 1,0	> 1,0
augenscheinliche Auffälligkeiten	keine	Feuchtespuren Salzablagerungen	Risse Hohllagen Betonabplatzungen

Das für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gewählte Schadensszenario der Tiefgarage ergibt sich aus Abbildung A-2.

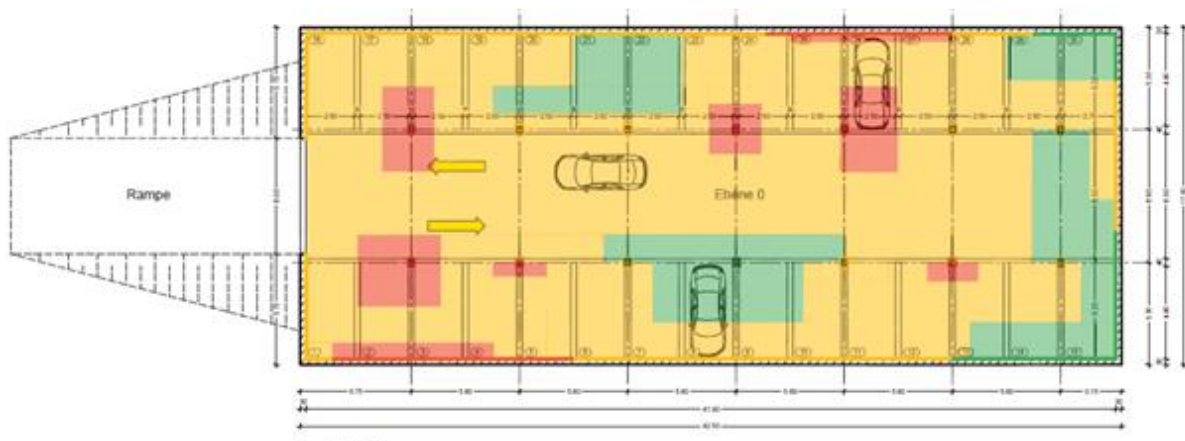


Abbildung A-2: Schadensszenario der Tiefgarage nach Tabelle A-1

Neben dem Schädigungspotential spielt bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch das Kostenniveau der auszuführenden Arbeiten eine entscheidende Rolle. Die der Kostenbetrachtung zu Grunde liegenden Einheitspreise sind aus dem Preisspiegel von realen Instandsetzungsmaßnahmen der Ingenieurgesellschaft Dauberschmidt und Vestner mbH entnommen. Grundlage des Preisspiegels bilden dabei drei Projekte mit mindestens drei bepreisten Angeboten von jeweils unterschiedlichen Bietern. Aus den Angeboten wurde jeweils der Medianwert gebildet, um den teils starken Preisschwankungen zwischen den Bietern gerecht zu werden. Für

Positionen, die nicht in den Angeboten enthalten waren, aber im Rahmen der Instandsetzungsplanung Verwendung fanden, wie z. B. das Monitoringsystem für das Verfahren 8.3, wurden bei den Herstellern Preise eingeholt.

### **Untersuchte Instandsetzungsvarianten**

Im Rahmen des Kostenvergleichs werden folgende Instandsetzungsvarianten für die vorgestellte Tiefgarage verglichen:

- Instandsetzungsvariante Verfahren 7.2
- Instandsetzungsvariante Verfahren 10
- Instandsetzungsvariante Verfahren 8.3 (komplett)
- Instandsetzungsvariante Verfahren 7.2/8.3 (Mischvariante)

Aufgrund des Schädigungsbilds der Tiefgarage, siehe Abbildung A-1, ist im Falle der Instandsetzungsvariante KKS und Verfahren 8.3/W-CI eine begleitende Einzelschadstelleninstandsetzung notwendig. Hierbei kommt es in räumlich begrenzten Bereichen von Hohllagen und Betonabplatzungen zu einer Reprofilierung mittels Instandsetzungsmörtel. Darüber hinaus wurde orientierend an den Vorgaben der Regelwerke auch eine Mischvariante 7.2/8.3 berechnet.

### **Planungsgrundlage**

Durch die Instandsetzungsvarianten soll unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen ein Mindestsollzustand angestrebt werden. Hierbei sind folgende Punkte sicherzustellen:

- Die chloridbelasteten Bauteile in der Tiefgarage werden instandgesetzt und mittels Oberflächenschutzsystem dauerhaft vor Korrosion geschützt.
- Die nicht chloridbelasteten aufgehenden Stahlbetonbauteile in der Tiefgarage werden mittels Oberflächenschutzsystem dauerhaft vor Feuchtigkeit und Korrosion geschützt.
- Die Tragfähigkeit in Bereichen mit starken Querschnittsverlusten an der Bewehrung wird durch Bewehrungszulagen im Bedarf wieder hergestellt.

Basierend auf dem Schadensszenario aus Abbildung A-2 ergibt sich die Festlegung der einzelnen Instandsetzungsbereiche mit den dazugehörigen Massen, vgl. Tabelle A-2.

Tabelle A-2: Massen der Instand zu setzenden Bauteile

Bauteil	Bemerkung	Masse LV
1	2	3
Instandsetzungsvariante Verfahren 7.2 / 10		
Stützen	Bauteile mit Chloridgehalten über 0,5 M.-%/z.	26 Stk.
Wände		182 lfm
Zwischendecke Rampe und Bodenplatte		1298 m <sup>2</sup>
Beschichtung aufgehende Bauteile	alle Bauteile	160 m <sup>2</sup>
Beschichtung horizontale Bauteile		1400 m <sup>2</sup>
Instandsetzungsvariante Verfahren 8.3		
Beschichtung aufgehende Bauteile	alle Bauteile	160 m <sup>2</sup>
Beschichtung horizontale Bauteile		1400 m <sup>2</sup>
Instandsetzungsvariante Verfahren 7.2/8.3		
Stützen	Bauteile mit Chloridgehalten über 1,0 M.-%/z.	12 Stk.
Wände		78 lfm
Zwischendecke Rampe und Bodenplatte		140 m <sup>2</sup>
Beschichtung aufgehende Bauteile	alle Bauteile	160 m <sup>2</sup>
Beschichtung horizontale Bauteile		1400 m <sup>2</sup>

### Grobkostenschätzung

Aufbauend auf den Instandsetzungsvarianten wurde für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine Kostenschätzung erarbeitet. Als Grundlage für die Kostenschätzung dienen die Massenannahmen aus Tabelle A-2. Der Kostenrahmen der Instandsetzungsmaßnahme ergibt sich aus Tabelle A-3.

Tabelle A-3: Kostenrahmen der Instandsetzungsvarianten

Varianten	Verfahren 7.2	Verfahren 10	Verfahren 8.3	Mischvariante 7.2/8.3
<b>Baustelleneinrichtung</b>	25.600,00 €	19.200,00 €	12.800,00 €	19.200,00 €
<b>Betonarbeiten inkl. Abstützungsmaßnahmen</b>	496.400,00 €	61.600,00 €	- €	66.100,00 €
<b>KKS</b>	- €	237.200,00 €	- €	- €
<b>Beschichtungsarbeiten</b>	60.500,00 €	60.500,00 €	60.500,00 €	60.500,00 €
<b>Sensoren</b>	- €	50.000,00 €	50.000,00 €	50.000,00 €
<b>Wartung/Instandhaltung</b>	120.000,00 €	130.000,00 €	170.000,00 €	170.000,00 €
<b>Summe</b>	<b>702.500,00 €</b>	<b>558.500,00 €</b>	<b>293.300,00 €</b>	<b>365.800,00 €</b>

Folgende Leistungen sind in den jeweiligen Gesamtkosten berücksichtigt:

- Baustelleneinrichtung (für einen Bauabschnitt)
- Schutzmaßnahmen
- Eigen-/Fremdüberwachung
- Baubegleitende Untersuchungen
- Abstützungsmaßnahmen im Falle einer konventionellen Instandsetzung
- Betoninstandsetzung (KKS bzw. konventionelle Instandsetzung)
- Oberflächenschutzsystem Bodenplatte und Zwischendecke
- Oberflächenschutzsystem aufgehende Bauteile
- Markierungs- und Malerarbeiten
- Nacharbeiten (Endreinigung)
- Regiearbeiten

Folgende Kosten sind in der Kostenschätzung nicht berücksichtigt:

- Haustechnikkosten (Umlegung Teile der Haustechnik für HDW-Arbeiten und Abstützungsmaßnahmen)
- Instandsetzung Brandschutz
- Instandsetzung Bauphysik
- Kosten Tragwerksplaner und Prüfstatiker
- Entsorgung von Schadstoffen
- Renovierungsanstriche Türen
- Baugenehmigung, Planungs- und Überwachungskosten nach HOAI

## Anhang B: Messergebnisse

## Sorptions- und Widerstandsmessung zu Abschnitt 6.2, Abschnitt 6.3.2 und Abschnitt 6.3.3

Tabelle B-1: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 0 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	A0-1		A0-2		A0-3		A0-4		A0-5		A0-6		WCL A0 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	4,87	92	4,94	85	4,90	80	4,84	91	5,12	94	5,21	84	4,98	0,15	88	5
	95 %	3,65	184	3,69	168	3,54	160	3,54	274	3,61	263	3,57	258	3,60	0,06	218	53
	85 %	3,22	330	3,20	316	3,09	327	3,28	465	3,09	505	3,11	427	3,17	0,08	395	81
	75 %	2,79	564	2,69	550	2,59	524	2,65	533	2,65	626	2,73	680	2,68	0,07	580	61
	65 %	2,33	839	2,19	818	2,16	776	2,41	1410	2,39	1677	-	-	2,30	0,11	1104	413
	55 %	1,91	1805	1,81	1801	1,83	1705	2,35	2035	2,19	2010	2,17	2437	2,04	0,22	1966	265
Adsorption	55 %	1,02	-	0,96	-	1,00	-	0,96	17777	0,91	17430	0,89	18500	0,96	0,05	17902	545
	65 %	1,25	-	1,28	-	1,34	-	1,22	7556	1,13	9805	1,14	8900	1,23	0,08	8760	651
	75 %	1,53	2417	1,59	2296	1,47	2224	1,79	3625	1,78	3798	1,57	3960	1,62	0,13	3053	821
	85 %	2,05	1417	2,01	1296	2,17	1224	1,95	1312	2,08	1415	1,99	1310	2,04	0,08	1329	75
	95 %	2,90	714	2,87	689	2,66	636	2,53	563	2,50	587	2,46	592	2,65	0,19	630	61
	100 %	4,87	92	4,94	85	4,90	80	4,84	91	5,12	94	5,21	84	4,98	0,15	88	5

Tabelle B-2: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	A2-1		A2-2		A2-3		A2-4		A2-5		A2-6		A2-7		A2-8	
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]
Desorption	100 %	5,26	38	5,13	37	5,29	25	5,13	25	5,12	36	5,26	35	4,94	34	5,45	31
	95 %	3,93	71	3,98	73	4,02	70	3,93	69	4,00	66	4,38	66	4,41	66	4,03	61
	85 %	3,31	279	3,36	297	3,44	318	3,22	266	3,18	232	3,46	252	3,50	231	3,28	389
	75 %	2,74	535	2,76	558	2,77	586	2,69	493	2,87	459	2,71	523	2,77	481	2,59	559
	65 %	2,08	899	2,20	951	2,07	743	2,19	822	2,33	857	2,11	912	2,28	832	2,09	678
	55 %	1,98	1115	1,80	1329	1,97	1133	1,69	1365	1,73	988	1,88	859	2,10	1023	1,99	1105
Adsorption	55 %	0,75	5744	0,91	4631	1,00	4002	0,75	4002	0,81	6553	0,86	6002	0,80	5611	0,81	5037
	65 %	0,95	4019	1,10	3640	1,10	3600	0,98	4899	0,99	4011	1,10	3870	1,25	3500	1,02	2240
	75 %	1,51	1005	1,56	1036	1,51	944	1,45	965	1,67	1033	1,44	896	1,41	905	1,67	1077
	85 %	2,10	560	1,81	689	2,01	495	2,29	574	2,1	813	1,85	550	1,80	580	2,20	550
	95 %	2,70	330	2,75	270	2,9	285	2,99	216	2,79	214	2,85	266	2,74	278	2,90	290
	100 %	5,26	36	5,13	40	5,29	35	5,70	31	5,12	37	5,26	36	4,94	34	5,45	33

Fortsetzung Tabelle B 2

Tabelle B-3: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	Fortsetzung von Tabelle B-2	A2-9		A2-10		WCL A2 Mittel			
			U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %		5,13	46	5,01	51	5,17	0,15	36	8
	95 %		3,95	181	4,20	194	4,08	0,18	92	51
	85 %		3,33	349	3,36	326	3,34	0,10	294	52
	75 %		2,95	483	2,89	483	2,77	0,11	516	42
	65 %		2,28	815	2,40	799	2,20	0,12	831	81
	55 %		2,25	1243	2,23	1434	1,96	0,19	1159	182
Adsorption	55 %		1,15	4905	1,15	4683	0,90	0,15	5117	846
	65 %		1,45	3109	1,33	4006	1,13	0,17	3689	691
	75 %	2,03	914	1,81	1031	1,61	0,19	981	64	
	85 %	2,36	448	2,40	445	2,09	0,22	570	111	
	95 %	3,26	183	3,02	186	2,89	0,17	252	49	
	100 %	5,13	46	5,01	51	5,23	0,22	38	6	

Tabelle B-4: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 4 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	A4-1		A4-2		A4-3		WCL A4 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	4,93	32	4,71	31	4,91	50	4,85	0,12	38	11
	95 %	4,47	72	4,27	73	4,32	80	4,35	0,11	75	4
	85 %	3,44	133	3,37	129	3,3319	164	3,38	0,06	142	19
	75 %	2,86	283	2,881	270	2,85	273	2,86	0,02	275	7
	65 %	2,34	499	2,41	514	2,29	521	2,35	0,06	511	11
	55 %	2,12	697	2,17	694	2,08	648	2,13	0,05	680	27
Adsorption	55 %	1,57	1382	1,60	1620	1,53	1602	1,57	0,03	1535	133
	65 %	1,86	655	1,99	591	1,88	614	1,91	0,07	620	32
	75 %	2,42	235	2,36	280	2,38	255	2,39	0,03	257	23
	85 %	3,09	88	3,01	91	2,95	113	3,01	0,07	97	14
	95 %	4,50	41	4,29	42	4,56	43	4,45	0,14	42	1
	100 %	4,93	32	4,71	31	4,91	50	4,85	0,12	38	11

Tabelle B-5: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,6, Cl<sup>-</sup> = 0 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	B0-1		B0-2		B0-3		B0-4		B0-5		B0-6		WCL B0 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	5,13	54,082	5,12	58,59	4,98	53,508	4,99	86	5,23	85	5,349	84	5,13	0,14	70	16
	95 %	3,53	148	3,72	154	3,63	141	3,35	300	3,09	339	3,24	313	3,43	0,24	233	94
	85 %	2,61	413	2,87	281	2,71	398,58	2,72	568	2,483	577	2,73	586	2,69	0,13	471	125
	75 %	2,01	877	2,20	944	2,16	822,44	2,06	1223	2,11	1132	2,34	940	2,15	0,12	990	155
	65 %	1,44	1205	1,63	1315	1,31	1112	1,97	-	2,05	-	2,01	-	1,74	0,32	1211	102
	55 %	1,02	1722	1,39	1629	1,01	1648	1,81	3099	1,89	2820	1,85	2271	1,49	0,41	2198	641
Adsorption	55 %	0,69	-	1,17	-	0,87	-	0,77	41625	0,864	44325	0,75	52425	0,85	0,17	46125	5620
	65 %	0,73	1581	1,34	1507,1	0,95	1498,8	1,17	5535	1,22	5378	1,31	4725	1,12	0,24	3371	2036
	75 %	1,29	-	1,58	-	1,43	-	1,47	5535	1,57	5378	1,31	4725	1,44	0,12	5213	430
	85 %	2,30	1273	2,29	1226	2,07	1224	1,79	1526	1,85	1553	1,79	1521	2,01	0,24	1387	161
	95 %	2,56	559,3	2,76	566,16	2,59	558,72	2,64	581	2,51	790	2,41	754	2,58	0,12	635	107
	100 %	4,88	54,082	4,95	58,59	4,98	53,508	4,99	86	5,23	85	5,349	84	5,06	0,18	70	16

Tabelle B-6: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,6, Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	B2-1		B2-2		B2-3		B2-4		B2-5		B2-6		WCL B2 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	5,30	46,41	5,49	42,86	5,51	42,13	5,02	76	5,16	51	5,14	47	5,27	0,20	51	13
	95 %	3,81	94,9	3,94	94,4	3,82	98,2	3,81	175	3,87	170	3,71	186	3,82	0,08	136	45
	85 %	3,06	195	3,09	207	3,209	208	3,01	387	3,209	335	2,92	382	3,08	0,11	286	92
	75 %	2,53	497	2,46	410	2,43	404	2,67	503	2,72	528	2,63	568	2,57	0,11	485	65
	65 %	1,85	986	1,68	1032,8	1,82	906,6	2,11	707	2,12	755	2,31	746	1,98	0,24	856	138
	55 %	1,34	1448	1,36	1540	1,38	1520	1,98	1323	1,96	1515	2,16	1184	1,70	0,38	1422	141
Adsorption	55 %	1,01	4887	1,05	4663	1,00	4971	0,945	8110	0,94	7008	1,09	4815	1,01	0,06	5742	1453
	65 %	1,32	1318	1,38	1446	1,459	1520	1,22	2487	1,19	2566	1,34	2021	1,32	0,10	1893	546
	75 %	1,79	1103	1,67	1540	1,74	1155,9	1,78	1163	1,84	1314	1,82	1163	1,77	0,06	1240	163
	85 %	2,29	681	2,39	661	2,28	2,487	2,16	567	2,33	536	2,13	572	2,26	0,10	503	252
	95 %	3,13	340,9	3,51	279	3,00	317,66	3,03	191	3,00	190	3,02	192	3,11	0,20	252	69
	100 %	5,30	46,41	5,49	42,86	5,51	42,13	5,02	76	5,16	51	5,14	47	5,27	0,20	51	13

Tabelle B-7: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM I, w/z = 0,6, Cl<sup>-</sup> = 4 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	B4-1		B4-2		B4-3		WCL B4 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	5,16	26,54	4,94	27,63	5,05	30,94	5,05	0,11	28	2
	95 %	4,27	66	4,35	67	4,11	69	4,24	0,12	67	2
	85 %	3,09	157	3,27	150	3,281	151	3,21	0,11	153	4
	75 %	2,56	300	2,45	329	2,70	325	2,57	0,13	318	16
	65 %	2,12	623	2,10	649	2,15	613	2,12	0,03	628	19
	55 %	1,81	824	1,78	919	1,92	772	1,83	0,07	838	75
Adsorption	55 %	1,14	1157	1,31	1323	1,40	1244	1,28	0,13	1241	83
	65 %	1,33	1080	1,44	1001	1,56	991	1,44	0,12	1024	49
	75 %	2,22	228	2,06	288	2,27	257	2,18	0,11	258	30
	85 %	2,83	108	2,89	114	3,00	93	2,90	0,09	105	11
	95 %	4,61	30	4,50	34	4,29	34	4,47	0,16	33	2
	100 %	5,16	26,54	4,94	27,63	5,05	30,94	5,05	0,11	28	2

Tabelle B-8: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM III, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 0 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	C0-1		C0-2		C0-3		C0-4		C0-5		C0-6		WCL C0 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	4,89	240	4,86	279	4,85	253	4,73	250	4,79	284	4,94	257	4,84	0,08	261	17
	95 %	4,01	480	3,88	423	3,92	455	3,77	509	4,03	509	3,93	464	3,92	0,09	473	33
	85 %	3,55	521	3,38	662	3,11	725	3,31	613	3,50	732	3,65	689	3,41	0,19	657	80
	75 %	3,38	983	2,99	1120	3,10	1033	2,77	1025	3,25	973	3,32	930	3,13	0,23	1011	65
	65 %	2,91	1615	2,87	1791	2,72	1697	2,68	1730	3,00	1544	2,95	1569	2,85	0,13	1658	97
	55 %	2,49	2615	2,38	3313	2,35	3199	2,33	2501	2,35	2350	2,60	2750	2,42	0,11	2788	387
Adsorption	55 %	1,47	14155	1,39	15203	1,39	14200	1,31	13560	1,29	15188	1,23	16155	1,35	0,09	14744	943
	65 %	1,95	5243	1,97	6273	1,89	6997	1,51	7995	1,42	10001	1,45	9563,3	1,70	0,26	7679	1866
	75 %	2,07	2187	2,52	2799	2,17	3701	1,68	*	1,78	5265	1,81	4950	2,00	0,31	3780	1330
	85 %	2,23	1978	2,46	-	2,33	2917	2,01	*	2,11	2516	2,16	2318	2,21	0,16	2432	392
	95 %	3,03	1132	3,05	1566	3,10	1066	2,45	*	2,45	1298	2,51	1073	2,76	0,33	1227	211
	100 %	4,87	240	4,86	279	4,85	253	4,73	250	4,73	245	4,96	245	4,83	0,09	252	14

\*Fehlmessung



Tabelle B-9: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM III, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	C2-1		C2-2		C2-3		C2-4		C2-5		C2-6		WCL C2 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]	
Desorption	100 %	5,30	46,41	5,49	42,86	5,51	42,13	5,02	76	5,16	51	5,14	47	5,27	0,20	51	13
	95 %	3,81	94,9	3,94	94,4	3,82	98,2	3,81	175	3,87	170	3,71	186	3,82	0,08	136	45
	85 %	3,06	195	3,09	207	3,209	208	3,01	387	3,209	335	2,92	382	3,08	0,11	286	92
	75 %	2,53	497	2,46	410	2,43	404	2,67	503	2,72	528	2,63	568	2,57	0,11	485	65
	65 %	1,85	986	1,68	1032,8	1,82	906,6	2,11	707	2,12	755	2,31	746	1,98	0,24	856	138
	55 %	1,34	1448	1,36	1540	1,38	1520	1,98	1323	1,96	1515	2,16	1184	1,70	0,38	1422	141
Adsorption	55 %	1,01	4887	1,05	4663	1,00	4971	0,945	8110	0,94	7008	1,09	4815	1,01	0,06	5742	1453
	65 %	1,32	1318	1,38	1446	1,459	1520	1,22	2487	1,19	2566	1,34	2021	1,32	0,10	1893	546
	75 %	1,79	1103	1,67	1540	1,74	1155,9	1,78	1163	1,84	1314	1,82	1163	1,77	0,06	1240	163
	85 %	2,29	681	2,39	661	2,28	2,487	2,16	567	2,33	536	2,13	572	2,26	0,10	503	252
	95 %	3,13	340,9	3,51	279	3,00	317,66	3,03	191	3,00	190	3,02	192	3,11	0,20	252	69
	100 %	5,30	46,41	5,49	42,86	5,51	42,13	5,02	76	5,16	51	5,14	47	5,27	0,20	51	13

Tabelle B-10: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM III, w/z = 0,5, Cl<sup>-</sup> = 4 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	C4-1		C4-2		C4-3		WCL C4 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	5,22	106	5,00	109	5,01	119	5,07	0,12	111	7
	95 %	4,62	251	4,58	234	4,53	240	4,58	0,04	242	9
	85 %	4,39	374	4,25	396	4,126	354	4,25	0,13	375	21
	75 %	3,70	523	3,829	494	3,98	472	3,83	0,14	496	26
	65 %	3,36	725	3,29	733	3,39	751	3,35	0,05	736	13
	55 %	2,99	931	2,94	833	3,04	881	2,99	0,05	882	49
Adsorption	55 %	2,11	3049	2,06	2828	2,10	3074	2,09	0,03	2984	135
	65 %	2,31	2010	2,24	2199	2,39	1987	2,31	0,08	2065	116
	75 %	2,56	952	2,65	956	2,72	936	2,64	0,08	948	11
	85 %	3,46	497	3,26	561	3,18	495	3,30	0,14	518	38
	95 %	4,21	239	4,19	231	4,16	214	4,19	0,03	228	13
	100 %	5,22	106	5,00	109	5,01	119	5,07	0,12	111	7

Tabelle B-11: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM III, w/z = 0,6, Cl<sup>-</sup> = 0 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	D0-1		D0-2		D0-3		D0-4		D0-5		D0-6		WCL D0 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	4,86	157	4,93	137	5,00	199	4,93	140	4,83	153	5,08	156	<b>4,94</b>	<b>0,09</b>	157	22
	95 %	4,17	391	4,25	359	4,15	453	4,05	434	3,95	461	4,16	357	<b>4,12</b>	<b>0,10</b>	409	46
	85 %	3,57	644	3,71	559	3,57	698	3,48	690	3,48	715	3,72	559	<b>3,59</b>	<b>0,11</b>	644	70
	75 %	3,28	750	3,24	819	3,24	861	2,93	951	3,15	803	3,42	708	<b>3,21</b>	<b>0,16</b>	815	85
	65 %	3,13	980	2,75	1100	2,53	1503	2,47	1433	2,95	1003	2,92	1057	<b>2,79</b>	<b>0,26</b>	1179	229
	55 %	2,03	3407	1,99	3201	1,97	3311	2,32	2850	2,34	2931	2,40	2851	<b>2,18</b>	<b>0,20</b>	3092	246
Adsorption	55 %	1,29	17500	0,75	20148	0,73	19203	0,83	25134	0,85	24571	0,74	35112	<b>0,87</b>	<b>0,21</b>	23611	6392
	65 %	1,39	*	1,20	*	0,86	*	1,08	6523	1,00	6498	0,84	8099	<b>1,06</b>	<b>0,21</b>	7040	917
	75 %	1,89	*	1,40	*	1,25	*	1,32	5341	1,49	5531	1,19	5597	<b>1,42</b>	<b>0,25</b>	5490	133
	85 %	2,28	*	2,01	*	1,61	*	1,95	3215	1,85	3611	1,81	3792	<b>1,92</b>	<b>0,23</b>	3539	295
	95 %	3,24	*	2,54	*	2,69	*	2,42	1866	2,53	1934	2,75	1550	<b>2,69</b>	<b>0,29</b>	1783	205
	100 %	4,91	157	4,96	137	4,98	199	4,93	140	4,75	153	5,05	156	<b>4,93</b>	<b>0,10</b>	157	22

\*Fehlmessung

Tabelle B-12: Ergebnisse der Sorptions-/Widerstandsmessung CEM III, w/z = 0,6, Cl<sup>-</sup> = 2 M.-%/z

Lagerung	rel. Feuchte	D2-1		D2-2		D2-3		D2-4		D2-5		D2-6		WCL D2 Mittel			
		U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	ρ [Ωm]	U [%]	U Stab [%]	ρ [Ωm]	ρ Stab [Ωm]
Desorption	100 %	5,31	69	5,11	96	4,98	81	4,95	88	5,13	65	5,04	62	<b>5,09</b>	<b>0,13</b>	77	36
	95 %	4,20	239	4,34	310	4,07	353	4,11	311	4,26	256	4,10	319	<b>4,18</b>	<b>0,11</b>	298	42
	85 %	3,84	491	3,93	489	3,88	522	3,75	569	3,91	486	3,90	499	<b>3,87</b>	<b>0,07</b>	509	32
	75 %	3,55	664	3,61	673	3,51	711	3,45	753	3,66	657	3,51	677	<b>3,55</b>	<b>0,08</b>	689	36
	65 %	2,75	925	3,09	928	2,94	958	2,85	1001	3,01	929	2,87	1015	<b>2,92</b>	<b>0,06</b>	959	40
	55 %	2,66	1243	2,75	1240	2,57	1253	2,55	1499	2,70	1277	2,53	1437	<b>2,63</b>	<b>0,09</b>	1325	113
Adsorption	55 %	0,87	4560	0,79	5681	1,01	3955	0,94	4237	0,93	4556	0,85	4788	<b>0,90</b>	<b>0,08</b>	4630	592
	65 %	1,00	3100	0,91	4231	1,09	2941	1,04	2677	0,99	3755	0,92	4003	<b>0,99</b>	<b>0,07</b>	3451	631
	75 %	1,37	2465	1,25	2331	1,51	1889	1,59	1799	1,45	2015	1,50	2188	<b>1,45</b>	<b>0,12</b>	2115	259
	85 %	2,21	1344	1,95	1699	2,10	1399	2,05	1487	1,93	1711	2,04	1394	<b>2,05</b>	<b>0,10</b>	1506	161
	95 %	3,16	622	3,10	712	3,44	699	3,19	784	3,11	741	3,20	680	<b>3,20</b>	<b>0,12</b>	706	55
	100 %	5,05	69	5,11	96	5,09	125	5,12	155	5,13	129	5,04	166	<b>5,09</b>	<b>0,04</b>	123	36

### Elektrolytwiderstandsmessung zu Abschnitt 6.3.3

Tabelle B-13: Ergebnisse der spez. Elektrolytwiderstandsmessung CEM I, w/z = 0,5

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten										
			1	3	5	6	7	8	10	11	12	14	15
CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 %  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	47	42	137	204	461	560	1083	1300	1585	1651	1774
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	15	9	72	97	266	262	310	214	386	345	357
	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	49	47	54	56	81	75	70	69	71	68	69
		98 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	13	7	14	15	27	19	19	23	39	3	5
	OS 4	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	60	64	99	127	147	166	331	480	547	839	1149
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	20	25	46	55	71	94	229	313	369	388	423
	OS 8	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	58	52	61	52	55	56	64	80	122	106	177
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	20	10	18	9	11	10	13	26	18	18	13
	PU	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	59	64	95	78	114	118	129	149	113	160	176
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	31	28	66	59	63	70	76	88	78	80	85
CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	39	46	53	58	223	426	1240	1437	1510	1487	1709
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	5	15	22	25	159	361	425	458	455	274	289
	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	37	46	50	54	59	68	64	76	61	86	65
		98 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	16	13	15	16	22	21	19	41	19	43	24
	OS 4	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	36	70	95	155	271	282	589	995	1085	2973	1401
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	10	24	38	69	137	146	480	336	374	548	268
	OS 8	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	41	50	56	57	67	68	98	102	100	127	150
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	5	12	14	14	17	16	21	18	19	14	23
	PU	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	44	54	55	61	75	69	118	128	128	144	147
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	9	19	6	13	22	8	30	21	19	33	39

Tabelle B-14: Ergebnisse der spez. Elektrolytwiderstandsmessung CEM I w/z = 0,6

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten										
			1	3	5	6	7	8	10	11	12	14	15
CEM I w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	26	36	45	52	538	912	929	937	1311	1471	1366
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	3	3	8	37	71	87	86	66	61	102	88
	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	25	42	40	42	54	46	37	39	48	61	58
		98 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	3	17	11	12	24	16	8	12	16	30	12
	OS 4	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	19	35	44	33	532	793	444	765	966	1058	986
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	4	8	6	8	352	513	526	533	688	709	120
	OS 8	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	19	26	42	32	149	183	141	137	139	140	115
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	5	10	28	9	109	135	108	131	105	118	107
	PU	$\bar{x}$ [ $\Omega\text{m}$ ]	37	27	43	52	140	171	98	101	153	159	140
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega\text{m}$ ]	23	11	17	28	64	31	35	55	23	31	12

Tabelle B-15: Ergebnisse der spez. Elektrolytwiderstandsmessung CEM III, w/z = 0,5

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten											
			1	3	5	6	7	8	10	11	12	14	15	
CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	108	114	325	438	666	847	1820	2083	2323	2251	2208	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	23	35	173	253	307	340	498	583	310	529	289	
	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	99	104	128	147	153	160	138	139	136	147	148	
		98 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	30	19	41	36	39	46	37	28	28	32	43	
	OS 4	$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	90	106	310	361	544	732	1279	1517	1669	1719	1882	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	24	62	180	202	352	465	458	471	525	567	543	
	OS 8	$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	73	109	141	132	166	165	231	237	236	307	330	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	16	15	46	40	54	58	87	59	72	117	127	
	PU	$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	89	118	167	156	201	175	277	294	294	370	394	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	23	61	73	70	109	50	104	88	92	90	109	
	CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	93	118	196	285	375	499	921	1797	2155	2483	2373
			55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	15	28	80	138	154	251	358	515	648	772	572
Ref.		$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	95	103	135	149	182	179	178	185	178	175	165	
		98 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	11	11	16	12	13	29	14	13	12	12	12	
OS 4		$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	110	126	195	285	348	547	692	1237	1898	2071	2073	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	11	16	26	40	52	82	151	476	225	168	467	
OS 8		$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	97	111	197	223	221	251	274	395	462	458	527	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	12	9	52	56	52	66	63	120	123	117	116	
PU		$\bar{x}$ [ $\Omega m$ ]	91	120	187	176	180	268	294	406	503	496	622	
		55 % r. F $\sigma$ [ $\Omega m$ ]	13	11	35	12	17	131	146	112	122	107	129	

Tabelle B-16: Ergebnisse der spez. Elektrolytwiderstandsmessung CEM III, w/z = 0,6

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten										
			1	3	5	6	7	8	10	11	12	14	15
CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [Ωm]	90	91	187	239	464	691	1397	1338	1465	1462	1669
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	15	11	49	80	286	333	338	95	113	365	227
	98 % r. F	$\bar{x}$ [Ωm]	90	95	135	152	145	140	142	144	153	140	118
		$\sigma$ [Ωm]	21	23	54	74	49	46	41	44	61	10	7
	OS 4	$\bar{x}$ [Ωm]	128	138	214	274	486	387	762	831	935	1368	1476
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	25	13	68	119	200	191	338	385	497	555	520
	OS 8	$\bar{x}$ [Ωm]	108	153	212	182	213	210	271	204	186	216	263
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	11	76	134	100	114	97	199	46	37	115	71
	PU	$\bar{x}$ [Ωm]	98	92	120	146	182	201	179	177	177	199	234
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	53	9	12	74	104	126	14	4	12	8	40
CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z  n = 8	Ref.	$\bar{x}$ [Ωm]	136	152	164	171	430	588	811	1318	1681	1872	1913
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	30	30	29	28	244	281	288	207	515	199	170
	98 % r. F	$\bar{x}$ [Ωm]	136	117	149	160	167	213	173	197	179	180	178
		$\sigma$ [Ωm]	48	13	25	25	27	34	39	86	46	48	12
	OS 4	$\bar{x}$ [Ωm]	108	147	184	223	302	401	948	1406	1380	1638	1803
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	21	13	16	24	36	130	157	255	209	93	88
	OS 8	$\bar{x}$ [Ωm]	100	145	165	171	198	201	238	428	439	614	679
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	21	26	28	39	50	37	35	207	169	337	386
	PU	$\bar{x}$ [Ωm]	143	143	218	177	241	224	300	314	321	447	485
		55 % r. F $\sigma$ [Ωm]	59	59	118	42	101	52	81	77	84	119	129

## Potentialmessung zu Abschnitt 6.4.2

Tabelle B-17: Ergebnisse Potentialmessung CEM I, w/z = 0,5

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten									
			1	3	5	7	9	10	12	14	15	
CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z n = 4	Ref.	$\bar{x}$ [mV]	-190	-157	-76	-39	-25	-10	-19	-20	-25	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	99	65	33	26	65	79	33	34	87
	Ref.	$\bar{x}$ [mV]	-200	-212	-228	-266	-249	-276	-269	-235	-222	
		98 % r. F	$\sigma$ [mV]	82	115	23	87	86	84	75	89	88
	OS 4	$\bar{x}$ [mV]	-159	-143	-56	-73	-28	-20	-15	-5	-12	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	49	61	26	38	12	64	14	18	25
	OS 8	$\bar{x}$ [mV]	-195	-149	-81	-109	-73	-60	-43	-31	-32	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	93	91	72	73	41	85	63	39	63
	PU	$\bar{x}$ [mV]	-214	-227	-136	-95	-40	-31	-22	-16	-30	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	92	96	81	81	25	25	14	28	12
	CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z n = 4	Ref.	$\bar{x}$ [mV]	-110	-108	-102	-35	-27	-42	-58	-73	-84
			55 % r. F	$\sigma$ [mV]	16	33	87	5	37	43	64	55
Ref.		$\bar{x}$ [mV]	-135	-122	-108	-91	-98	-96	-83	-97	-75	
		98 % r. F	$\sigma$ [mV]	98	44	78	39	50	79	37	17	26
OS 4		$\bar{x}$ [mV]	-97	-88	-67	-47	-20	-39	-21	-32	-54	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	23	24	27	16	21	9	29	35	45
OS 8		$\bar{x}$ [mV]	-83	-101	-114	-1110	-49	-127	-36	-27	-29	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	27	29	97	39	34	98	8	20	30
PU		$\bar{x}$ [mV]	-153	-150	-131	-104	-90	-84	-68	-51	-51	
		55 % r. F	$\sigma$ [mV]	26	55	29	25	26	6	25	29	27

Tabelle B- 18: Ergebnisse Potentialmessung CEM III, w/z = 0,5

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten									
			1	3	5	7	9	10	12	14	15	
CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z n = 4	Ref. 55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-169	-188	-224	-91	-13	11	50	49	51	
		$\sigma$ [mV]	44	81	86	72	30	39	87	66	49	
	Ref. 98 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-201	-179	-160	-167	-155	-160	-141	-160	-129	
		$\sigma$ [mV]	86	87	61	137	41	80	107	89	70	
	OS 4 55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-148	-177	-154	-46	-77	-26	-15	-10	11	
		$\sigma$ [mV]	45	33	80	18	57	33	44	43	26	
	OS 8 55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-195	-191	-146	-135	-152	-74	-113	-43	-36	
		$\sigma$ [mV]	56	16	60	24	77	11	39	58	15	
	PU 55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-172	-194	-214	-132	-123	-121	-120	-94	-52	
		$\sigma$ [mV]	89	73	126	46	25	88	17	17	45	
	CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z n = 4	Ref. 55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-133	-142	-192	-129	-89	-53	-47	-42	-39
			$\sigma$ [mV]	74	59	89	67	45	31	32	26	28
Ref. 98 % r. F		$\bar{x}$ [mV]	-204	-188	-152	-159	-164	-179	-101	-89	-76	
		$\sigma$ [mV]	34	97	83	78	97	50	79	8	6	
OS 4 55 % r. F		$\bar{x}$ [mV]	-302	-291	-100	-85	-72	-67	-55	-50	-47	
		$\sigma$ [mV]	3	5	22	24	24	8	26	29	30	
OS 8 55 % r. F		$\bar{x}$ [mV]	-137	-134	-133	-131	-96	-72	-58	-44	-34	
		$\sigma$ [mV]	56	109	107	146	44	39	40	34	40	
PU 55 % r. F		$\bar{x}$ [mV]	-77	-119	-159	-110	-123	-122	-43	-42	-46	
		$\sigma$ [mV]	24	101	54	102	70	58	82	97	96	



Tabelle B- 19: Ergebnisse Potentialmessung CEM III, w/z = 0,6

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten									
			1	3	5	7	9	10	12	14	15	
CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z  n = 4	Ref.	$\bar{x}$ [mV]	-172	-174	-151	-140	6	66	60	60	42	
		$\sigma$ [mV]	75	36	30	46	33	90	79	95	76	
	55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-193	-195	-148	-147	-228	-166	-198	-171	-157	
		$\sigma$ [mV]	118	105	86	68	129	141	97	70	54	
	Ref.	$\bar{x}$ [mV]	-266	-209	-130	-78	-57	-49	-42	-23	-16	
		$\sigma$ [mV]	49	67	31	51	43	40	37	36	42	
	OS 4	$\bar{x}$ [mV]	-182	-176	-157	-248	-102	-59	-37	-17	-16	
		$\sigma$ [mV]	35	34	76	26	52	72	21	38	43	
	55 % r. F	$\bar{x}$ [mV]	-223	-263	-184	-120	-65	-100	-46	-24	-22	
		$\sigma$ [mV]	60	69	73	46	28	122	28	47	45	
	CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z  n = 4	Ref.	$\bar{x}$ [mV]	-86	-90	-70	-24	64	74	70	54	44
			$\sigma$ [mV]	128	128	30	18	24	31	23	18	20
55 % r. F		$\bar{x}$ [mV]	-212	-149	-98	-146	-102	-119	-113	-74	-72	
		$\sigma$ [mV]	120	120	60	144	178	146	79	82	45	
Ref.		$\bar{x}$ [mV]	-220	-190	-29	-26	-119	44	17	19	-13	
		$\sigma$ [mV]	112	112	42	35	158	31	50	30	53	
OS 4		$\bar{x}$ [mV]	-151	-141	-54	-44	-49	-14	-4	1	-6	
		$\sigma$ [mV]	123	123	8	13	25	37	65	49	67	
55 % r. F		$\bar{x}$ [mV]	-210	-151	-42	-35	-9	3	19	56	50	
		$\sigma$ [mV]	102	102	27	27	22	21	9	29	34	

## Korrosionsstrommessung zu Kapitel 6.4.4

Tabelle B-20: Ergebnisse Korrosionsstrommessung CEM I, w/z = 0,5

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten									
			1	3	5	7	9	10	12	14	15	
CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z	Ref. 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	155,7	56,65	22,05	0,898	0,118	0,032	0,025	0,066	0,076	
		min [ $\mu$ A]	11,15	1,002	0,020	0,035	0,001	0,001	0,001	0,027	0,002	
		max [ $\mu$ A]	368,0	116,0	87,98	7,631	0,25	0,13	0,05	0,09	0,013	
	Ref. 98 % r. F n = 6	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	113,4	234,1	110,2	177,2	290,8	420,4	452,8	234,6	241,8	
		min [ $\mu$ A]	18,36	46,12	47,88	79,06	54,58	61,24	28,76	1,56	1,05	
		max [ $\mu$ A]	227,4	610,8	175,8	303,4	1081	1102	1303	841,2	880,6	
	OS 4 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	82,57	61,24	6,92	11,79	0,820	0,875	0,244	0,090	0,124	
		min [ $\mu$ A]	4,104	1,392	0,451	0,207	0,050	0,001	0,001	0,001	0,001	
		max [ $\mu$ A]	255,2	181,9	13,67	32,93	1,673	2,454	0,790	0,293	0,597	
	OS 8 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	95,65	164,8	51,52	55,19	78,79	35,83	20,00	8,822	11,27	
		min [ $\mu$ A]	4,229	6,233	0,362	0,067	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
		max [ $\mu$ A]	290,9	543,7	139,2	163,5	274,6	108,6	51,24	23,49	34,76	
	PU 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	125,6	231,7	94,72	61,30	32,51	18,43	16,90	18,68	16,30	
		min [ $\mu$ A]	25,27	4,304	2,902	0,409	1,782	1,290	1,199	0,001	0,788	
		max [ $\mu$ A]	269,4	609,5	175,9	123,6	83,20	65,30	62,80	73,95	59,05	
	CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z n = 4	Ref. 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	0,238	0,337	0,294	0,062	0,020	0,019	0,032	0,015	0,011
			min [ $\mu$ A]	0,033	0,142	0,042	0,029	0,001	0,003	0,009	0,013	0,006
			max [ $\mu$ A]	0,503	1,198	0,531	0,105	0,071	0,065	0,105	0,024	0,178
Ref. 98 % r. F n = 6		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	1,349	2,205	0,713	1,919	1,164	2,006	1,677	1,683	1,367	
		min [ $\mu$ A]	0,534	0,033	0,030	0,132	0,045	0,022	0,179	0,179	0,100	
		max [ $\mu$ A]	21,10	16,06	1,607	7,963	5,528	4,902	5,048	1,627	1,688	
OS 4 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	0,459	0,526	0,114	0,050	0,072	0,083	0,012	0,014	0,015	
		min [ $\mu$ A]	0,262	0,409	0,036	0,038	0,000	0,020	0,000	0,000	0,007	
		max [ $\mu$ A]	0,575	1,160	0,175	0,059	0,015	0,170	0,014	0,018	0,026	
OS 8 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	0,350	0,372	0,570	0,234	0,119	0,218	0,059	0,043	0,045	
		min [ $\mu$ A]	0,099	0,033	0,014	0,010	0,003	0,047	0,008	0,004	0,004	
		max [ $\mu$ A]	0,956	1,415	1,374	0,568	0,255	0,318	0,160	0,128	0,133	
PU 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	0,948	1,330	0,821	0,566	0,373	0,334	0,210	0,120	0,121	
		min [ $\mu$ A]	0,099	0,033	0,014	0,010	0,003	0,047	0,008	0,004	0,004	
		max [ $\mu$ A]	0,956	1,415	1,374	0,568	0,255	0,318	0,160	0,128	0,133	

Tabelle B-21: Ergebnisse Korrosionsstrommessung CEM III, w/z = 0,5

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten									
			1	3	5	7	9	10	12	14	15	
CEM III w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z	Ref. 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	50,12	40,57	15,23	1,966	0,951	0,278	0,421	0,669	0,515	
		min [ $\mu$ A]	3,650	2,858	0,205	0,099	0,109	0,000	0,000	0,106	0,105	
		max [ $\mu$ A]	159,8	134,6	56,90	3,756	2,476	0,513	0,892	0,979	0,673	
	Ref. 98 % r. F n = 6	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	143,1	195,6	141,2	308,6	139,4	118,4	134,7	183,5	39,65	
		min [ $\mu$ A]	3,650	2,858	0,205	0,099	0,109	0,109	0,149	0,106	0,105	
		max [ $\mu$ A]	408,8	497,0	471,0	531,2	279,8	329,2	342,4	203,4	52,70	
	OS 4 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	87,53	94,07	16,59	17,18	3,613	1,421	0,726	2,539	1,212	
		min [ $\mu$ A]	12,96	1,174	0,097	0,085	0,001	0,001	0,001	0,084	0,063	
		max [ $\mu$ A]	278,6	140,8	29,36	31,66	7,886	3,336	1,508	7,554	2,920	
	OS 8 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	193,1	80,64	56,94	66,78	23,04	12,48	5,065	9,033	2,620	
		min [ $\mu$ A]	33,46	19,51	35,78	33,32	8,704	5,172	2,556	3,344	1,795	
		max [ $\mu$ A]	310,4	125,4	73,34	128,2	33,98	25,98	9,078	21,42	4,256	
	PU 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	56,25	90,68	30,40	17,24	20,75	14,40	4,800	4,591	7,534	
		min [ $\mu$ A]	6,275	17,24	2,778	0,820	0,308	0,286	0,256	0,514	1,431	
		max [ $\mu$ A]	164,4	231,8	86,40	51,32	47,08	37,44	10,92	11,23	22,24	
	CEM I w/z = 0,5 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z n = 4	Ref. 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	5,734	5,734	3,273	2,320	0,342	0,132	0,091	0,074	0,064
			min [ $\mu$ A]	0,210	1,213	1,612	0,121	0,102	0,027	0,027	0,019	0,019
			max [ $\mu$ A]	11,60	9,805	6,317	6,500	0,643	0,285	0,179	0,159	0,140
Ref. 98 % r. F n = 6		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	6,097	4,560	2,807	2,899	1,705	3,275	1,713	0,975	0,818	
		min [ $\mu$ A]	0,200	0,152	0,100	0,130	0,137	0,116	0,105	0,354	0,305	
		max [ $\mu$ A]	11,99	11,06	5,513	5,668	3,272	6,433	3,322	1,597	1,331	
OS 4 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	8,515	1,203	0,898	0,641	0,274	0,193	0,153	0,116	0,104	
		min [ $\mu$ A]	0,883	0,295	0,025	0,019	0,011	0,007	0,007	0,007	0,005	
		max [ $\mu$ A]	15,35	5,937	1,762	1,346	0,558	0,309	0,317	0,224	0,209	
OS 8 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	4,089	4,223	4,426	5,278	0,199	0,759	0,637	0,412	0,351	
		min [ $\mu$ A]	0,883	0,295	0,025	0,019	0,011	0,007	0,007	0,007	0,005	
		max [ $\mu$ A]	15,35	11,06	5,513	5,668	3,272	6,433	3,322	1,597	1,331	
PU 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu$ A]	1,995	8,856	0,502	0,299	0,830	0,088	0,061	0,057	0,057	
		min [ $\mu$ A]	0,545	0,670	0,061	0,010	0,019	0,034	0,028	0,025	0,027	
		max [ $\mu$ A]	3,113	1,311	1,105	0,751	2,972	0,213	0,118	0,114	0,116	

Tabelle B 22: Ergebnisse Korrosionsstrommessung CEM III, w/z = 0,6

Beton	Variante	Wert	Auslagerung in Monaten									
			1	3	5	7	9	10	12	14	15	
CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 2 M.-%/z	Ref. 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	26,93	15,76	1,045	4,688	0,340	0,058	0,070	0,195	0,081	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	2,346	3,474	0,127	8,810	0,065	0,000	0,000	0,000	5,110	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	224,40	141,2	18,90	50,42	2,754	0,393	0,458	1,171	246,8	
	Ref. 98 % r. F n = 6	$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	148,1	117,5	66,31	48,35	148,0	138,8	130,6	112,0	91,99	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	3,138	1,926	0,020	1,564	10,97	9,552	19,16	23,72	23,90	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	350,0	267,0	148,9	107,9	349,4	318,6	336,0	275,0	228,6	
	OS 4 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	27,72	67,14	14,67	6,654	5,796	4,989	3,699	1,782	3,909	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	256,4	69,12	39,54	29,30	5,530	4,614	3,620	2,796	0,000	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	387,6	360,0	104,2	58,86	32,08	27,26	20,28	10,99	143,2	
	OS 8 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	109,8	147,2	55,29	56,45	7,456	14,97	7,474	5,223	6,070	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	188,9	0,020	1,887	2,378	2,152	0,599	0,840	0,158	0,569	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	429,6	291,0	78,44	292,0	33,80	35,42	15,15	10,73	53,18	
	PU 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	122,2	162,8	23,03	153,9	54,55	16,05	11,38	10,06	7,837	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	2,075	19,88	10,23	10,65	3,151	3,540	2,670	0,196	4,776	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	137,5	144,9	74,48	32,25	14,00	69,46	10,32	4,137	174,7	
	CEM III w/z = 0,6 Cl <sup>-</sup> = 1 M.-%/z n = 4	Ref. 55 % r. F n = 4	$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	14,28	117,9	9,920	4,003	0,178	0,046	0,030	0,093	0,058
			min [ $\mu\text{A}$ ]	0,021	0,022	0,007	0,004	0,014	0,001	0,005	0,003	0,002
			max [ $\mu\text{A}$ ]	34,50	6,537	0,830	0,867	1,125	0,056	0,031	0,031	0,085
Ref. 98 % r. F n = 6		$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	18,33	227,1	50,75	100,3	104,3	101,1	81,08	64,47	52,59	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	0,153	0,153	0,011	0,019	0,043	0,008	0,021	0,078	0,256	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	27,03	26,65	8,498	25,60	31,50	29,45	20,70	12,85	10,81	
OS 4 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	11,78	32,99	0,657	0,862	0,961	0,042	0,055	0,056	0,109	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	0,021	0,022	0,007	0,004	0,014	0,000	0,005	0,003	0,002	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	34,50	6,537	0,830	0,867	1,125	0,056	0,031	0,031	0,085	
OS 8 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	10,83	21,09	0,788	0,953	0,760	0,336	0,271	0,258	0,318	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	0,699	1,500	0,002	0,046	0,072	0,044	0,062	0,020	0,014	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	16,44	16,62	1,397	0,988	0,758	0,422	0,367	0,265	0,542	
PU 55 % r. F n = 4		$\bar{x}$ [ $\mu\text{A}$ ]	29,37	4,760	7,336	4,701	2,223	1,617	0,813	0,222	0,275	
		min [ $\mu\text{A}$ ]	0,351	1,268	0,114	0,960	0,479	0,334	0,182	0,005	0,047	
		max [ $\mu\text{A}$ ]	3,113	14,78	64,26	2,732	1,089	0,802	0,436	0,395	0,362	