

# Datengesteuerte Multisensor-Fusion zur Korrosionsprüfung von Stahlbetonbauteilen

Christoph VÖLKER<sup>1</sup>, Sabine KRUSCHWITZ<sup>1,2</sup>, Gino EBELL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> Technische Universität Berlin, Berlin

Kontakt E-Mail: christoph.voelker@bam.de

**Kurzfassung.** Potentialfeldmessung (PM) ist die beliebteste Methode der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zur Lokalisierung von aktiver Betonstahlkorrosion. PM wird durch Parameter wie z. B. Feuchtigkeits- und Chloridgradienten im Bauteil beeinflusst, so dass die Sensitivität gegenüber der räumlich sehr begrenzten, aber gefährlichen Lochkorrosion gering ist. Wir zeigen in dieser Studie, wie zusätzliche Messinformationen mit Multisensor-Datenfusion genutzt werden können, um die Detektionsleistung zu verbessern und die Auswertung zu automatisieren. Die Fusion basiert auf überwachtem maschinellen Lernen (ÜML). ÜML sind Methoden, die Zusammenhänge in (Sensor-) Daten anhand vorgegebener Kennzeichnungen (Label) erkennen. Wir verwenden ÜML um „defekt“ und „intakt“ gelabelte Bereiche in einem Multisensordatensatz zu unterscheiden. Unser Datensatz besteht aus 18 Messkampagnen und enthält jeweils PM-, Bodenradar-, Mikrowellen-Feuchte- und Wenner-Widerstandsdaten. Exakte Label für veränderliche Umweltbedingungen wurden in einer Versuchsanordnung bestimmt, bei der eine Stahlbetonplatte im Labor kontrolliert und beschleunigt verwittert. Der Verwitterungsfortschritt wurde kontinuierlich überwacht und die Korrosion gezielt erzeugt. Die Detektionsergebnisse werden quantifiziert und statistisch ausgewertet. Die Datenfusion zeigt gegenüber dem besten Einzelverfahren (PM) eine deutliche Verbesserung. Wir beschreiben die Herausforderungen datengesteuerter Ansätze in der zerstörungsfreien Prüfung und zeigen mögliche Lösungsansätze.

## 1 Einleitung

Korrosion in Stahlbeton ist einer der wichtigsten häufigsten Schadensmechanismen im Bauwesen. Bauten im maritimen Umfeld sowie Verkehrsbauwerke sind durch erhöhte Salzexposition besonders gefährdet. Das beliebteste ZfP-Verfahren zur Detektion aktiver Korrosionsvorgänge ist die Potentialfeldmessung (PM) - dabei wird das elektrische Potential der Bewehrung gegenüber einer Referenzelektrode an der Bauteiloberfläche gemessen. Ein hohes negatives Potential deutet auf eine aktive Korrosionsstelle hin. Es ist allgemein akzeptiert, dass die Messwerte durch Umwelteinflüsse (verursacht durch Feuchte- und Chloridgradienten im Bauteil, Sauerstoffverfügbarkeit etc.) und Strukturrauschen (verursacht durch variierende Oberflächeneigenschaften, Inhomogenität, variierende Betondeckung etc.) beeinflusst werden [1, 2]. Vielzählige Einflussparameter können zwar theoretisch messtechnisch bestimmt werden, um die Einflüsse bei der Auswertung zu berücksichtigen fehlt jedoch ein tieferes physikalisches Verständnis für die Signal-Umwelt Interaktion in der Vielfalt der Prüfzenarien.



Der vorliegende Beitrag beschreibt am Beispiel von Korrosion im Betonstahl, wie Datengesteuerte Multisensor-Fusion zur Erhöhung der Sensitivität und Robustheit von multisensorieller ZfP eingesetzt werden können. Datengesteuert meint, dass Zusammenhänge aus den Messdaten abgeleitet werden, ohne dass ein physikalisches Modell zugrunde liegt. Das hat den Vorteil, dass fundamental unterschiedliche Messmethoden (wie zum Beispiel elektromagnetische Radarwellen und das elektrochemische Bewehrungspotential) gemeinschaftlich verarbeitet werden können. Dazu wird ein Verfahren aus dem überwachten Maschinellen Lernen (ML) verwendet. Es erkennt (bzw. lernt) Zusammenhänge durch die Analyse von Paaren aus Datenpunkten und zugehörigem Label (sog. Trainingsdaten). Die Label ordnen jedem Datenpunkt die gesuchte Messinformation zu (z.Bsp. Korrosionsstelle/intakte Stelle). Die Leistungsfähigkeit von ML-Ansätze ist durch die Ausnutzung von Korrelationsstrukturen in den Multisensordatensätzen gegenüber Einzelsensoren potenziell höher. Für die Implementierung etwaiger Ansätze werden jedoch Methoden zur Erzeugung eindeutig referenzierbarer, der Variabilität im Feld und realen Problemstellungen entsprechender Trainingsdaten benötigt.

Wir zeigen, wie ein solcher Datensatz für die ZFP chloridinduzierter Lochkorrosion erzeugt werden kann. Dazu werden die Verwitterungsprozesse eines Salz-exponierten Betonprobekörpers beschleunigt simuliert. Die Verwitterung wird mit für die Korrosionsdetektion häufig verwendeten Verfahren Bodenradar [3], PM [1], Wenner-Widerstandsmessungen (WR) [4] und Mikrowellen-Feuchte (MW) [5] begleitet. Das Experiment wurde so durchgeführt, dass für jeden Messzeitpunkt und Messort die zugehörige Messinformation als Datenlabel a-priori bekannt ist. Die Fusion der Korrosionsdaten erfolgt mit logistischer Regression. Die Fusionsergebnisse werden anhand von Richtig-Positiv-(TPR) und Falsch-Positiv-Raten (FPR) evaluiert und der Auswertung nach DGZfP Merkblatt B3 [1] und dem amerikanischen Standard ASTM C876 [6] gegenübergestellt.

## 2 Experiment

### 2.1 Versuchsaufbau

Das Experiment simuliert drei, für den Lebenszyklus eines chloridbeaufschlagten Betonbauteils, repräsentative Zustände:

1. Ungeschädigter Referenzzustand (Probekörper nach der Betonage)
2. Gebrauchter Zustand (Probekörper enthält Chloride, keine Korrosion)
3. Defekter Zustand (Probekörper enthält Chloride und korrodiert)

Der ungeschädigte Referenzzustand repräsentiert ein Bauteil ohne Chloridbelastung und entspricht dem Probekörper nach der Betonage. Der gebrauchte Zustand repräsentiert ein über längere Zeit Chloriden ausgesetztes Bauteil. Der Chloridgehalt in der Betondeckung ist erhöht. Korrosion findet nicht statt. Der defekte Zustand repräsentiert ein Bauteil, bei dem der Schädigungsprozess einsetzt. Chloride befinden sich in der Betondeckung und überschreiten am Stahl die kritische korrosionsauslösende Konzentration. Um die Zustände zu erzeugen, werden zunächst Chloride beschleunigt in das Bauteil eingebracht ohne ungewollte Korrosion zu erzeugen. Anschließend wird Korrosion gezielt ausgelöst und überwacht.

### 2.2 Beschreibung der Probekörper

Der Versuch wurde in zwei Kampagnen auf Ober- und Unterseite eines Betonprobekörpers durchgeführt. Der Probekörper ist eine Betonplatte mit den Abmaßen 1 x 1,4 x 0,3 m<sup>3</sup> (LBH) (siehe **Abb.1**). Die Betondeckung beträgt 4,5 Zentimeter. Der Probekörper besteht aus einem

gut verdichteten Beton der Zielfestigkeitsklasse C30/37. Der Frischbetonporenanteil beträgt 1,4%. Die Sieblinienklasse ist AB 8. Der Wasser-Zement-Wert beträgt 0,49. Der verwendete Zement ist ein Portland-Puzzolan CEM II/A-LL 32,5 R. Die Plattenbewehrung besteht aus 10 Millimeter dickem Baustahl (BST 500). Der Bewehrungsabstand beträgt in Längsrichtung etwa 16 und in Querrichtung etwa 15 Zentimeter. Die Entwurfparameter sind einem Verkehrsbauwerk nach DIN Fachbericht 102 nachempfunden, da diese Bauwerke großen Mengen Streusalz ausgesetzt sind und somit besonders gefährdet sind. Durch die produktionsbedingte höhere Verdichtung des Betons an der Bauteilunterseite entspricht die zweite Kampagne einem Bauteil mit erhöhter Qualität hinsichtlich Dichtigkeit und Porengehalt gegenüber den Messungen an der Oberseite.

Während des gesamten Experiments wurde das Bewehrungspotential gegen eine von zwei an Ober- und Unterseite des Probekörpers eingebaute Mangandioxid (MnO<sub>2</sub>)-Referenzelektroden ERE 20 [7] gemessen.



**Abb. 1.** Korrosionsprobekörper; Links: Draufsicht auf Probekörper mit rot markierten Korrosionselektroden, grün markierten Chloridmigrationssensoren und blau markierten ERE 20 Referenzelektroden vor der Betonage; Rechts: Probekörper mit Salzwasserbad während des potentiostatischen Chlorideintrags.

### 2.2.1 Beschleunigte Chloridpenetration und -überwachung

Das Erreichen erhöhter Chloridkonzentration bis in einige Zentimeter Tiefe dauert in Praxis mehrere Jahre [8]. Der Chlorideintrag wird deshalb mit der Polarisationsmethode beschleunigt – ein in der Qualitätssicherung von Beton etabliertes Verfahren [9, 10]. Es basiert auf dem Bestreben von Ionen, sich in einem elektrischen Feld in die Richtung des entgegengesetzten Pols zu bewegen. Die negativ geladenen Chloridionen (Anionen) bewegen sich zum positiven Pol, der Anode [10]. Bei der Übertragung der Methode von kleinen Betonproben auf große Stahlbetonprobekörper besteht die Gefahr, dass Korrosion durch zu schnelles Erreichen erhöhter Chloridkonzentrationen an beliebigen Abschnitten der Bewehrung entsteht. Das für datengesteuerte Ansätze benötigte a-priori Wissen könnte in dem Fall nicht erlangt werden.

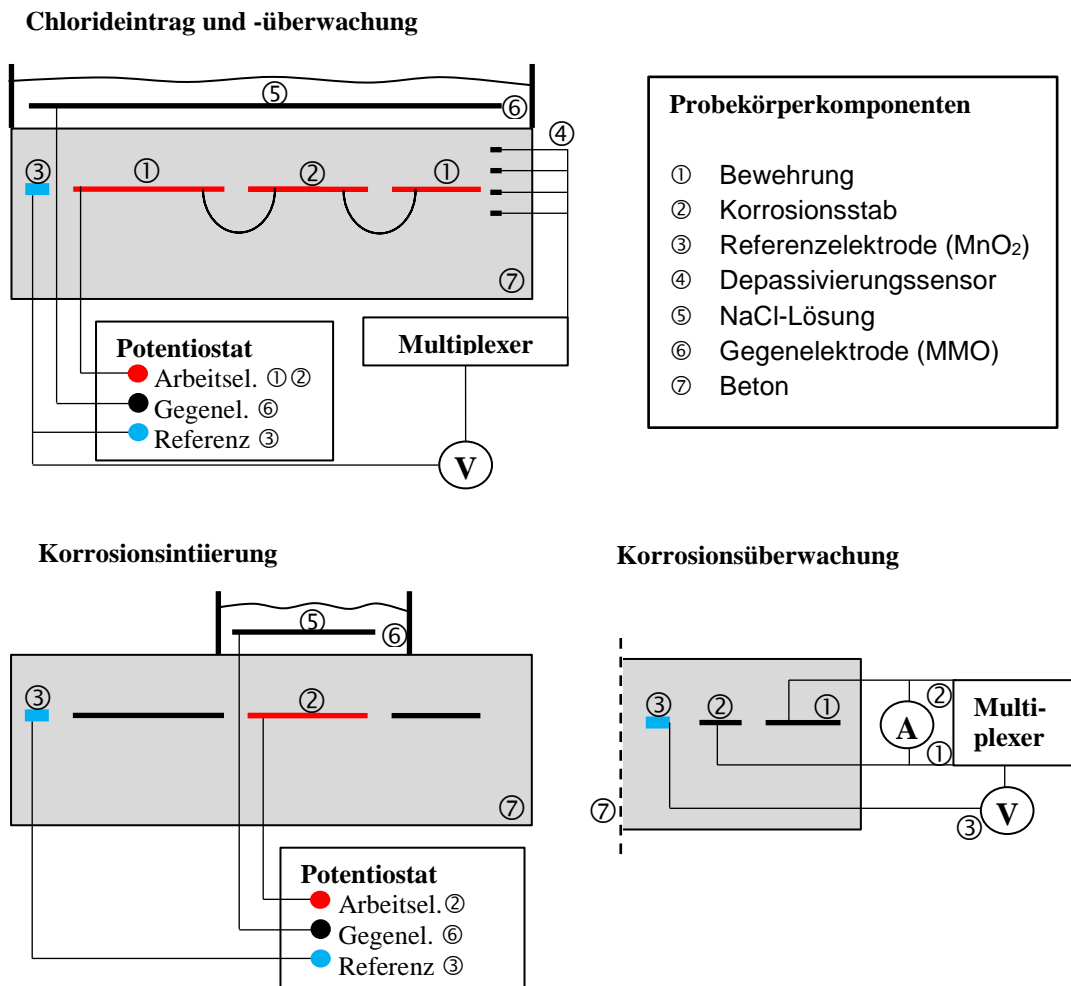
Im präsentierten Versuchsaufbau ist die Bewehrung der positive Pol gegenüber einem Mangan-Mischoxid-Gitter in einer Natriumchloridlösung auf dem Probekörper als negativem Pol (vgl. **Abb. 1**). Durch die potentiostatische Polarisation wird das Bewehrungspotential auf einem definierten Potential gehalten, der dazu benötigte Strom wird dynamisch generiert [11]. Eine Schaltskizze des Polarisationsaufbaus ist in **Abb. 2** (oben) dargestellt.

Die Chloridmigration wurde mit Depassivierungssensoren überwacht. Eine Schaltskizze der Messanordnung ist in **Abb. 2** (oben) dargestellt. Ähnlich wie bei der Anodenleiter [12] werden Stäbe aus Schwarzstahl in verschiedenen Tiefen eingebaut. Der zeitliche Verlauf des

Potentials der Stäbe gegen die Referenzelektrode wird mit einem Multi-Kanal-Datenlogger (Multiplexer) aufgezeichnet. Ein stark abfallendes Potential kennzeichnet den Beginn der Korrosion – verursacht durch das Erreichen einer kritischen korrosionsauslösenden Chloridkonzentration in der jeweiligen Tiefenlage.

### 2.3 Korrosionsinitiierung und Überwachung

Die Korrosion wird durch die anodische Polarisation der Bewehrung über das kritische, korrosionsauslösende Potential hinaus realisiert. Eine Schaltskizze des Aufbaus ist in **Abb.2** unten links dargestellt. Der Aufbau ähnelt dem des beschleunigten Chlorideintrags. Allerdings wird nicht die gesamte Bewehrung, sondern lediglich ein elektrisch isolierter Korrosionsstab anodisch polarisiert. Als Gegenelektrode wurde ein Titanmischoxidgitter verwendet, als Elektrolyt dient dabei eine Natrium-Chlorid-Lösung. Der Polarisationsstrom wurde aufgezeichnet. Ein plötzlicher Anstieg zeigt den Beginn der aktiven Korrosion an [13]. Die Korrosionsstäbe bestehen aus je einem 50 Millimeter langen Bewehrungsstahl mit einem Durchmesser von zehn Millimetern und haben eine Betondeckung von circa 4,5 Zentimetern (wie die restliche Bewehrung).



**Abb. 2.** Schaltskizzen für die Arbeitsschritte zur Erzeugung der Verwitterungsstufen; Oben links: Chlorideintrag und Überwachung; Oben rechts: Probekörperkomponenten; Unten links: Korrosionserzeugung; Unten rechts: Korrosionsüberwachung.

Für die Überwachung der Korrosion wird wie in [14] angenommen, dass die anodische Teilreaktion auf dem Korrosionsstab und die kathodische Teilreaktion auf dem Rest der Bewehrung stattfinden. Die elektrische Trennung von Anode und Kathode erlaubt die Messung des Korrosionsstroms über den Spannungsabfall beim Kurzschluss mit einem Shuntwiderstand. Daraus kann – unter der Annahme, dass die vollständige Oberfläche des Korrosionsstabs aktiv korrodiert – die Korrosionsstromdichte als Maß für die Korrosionsaktivität berechnet werden.

#### 2.4 Beschreibung der ZfP-Messungen

Für die Bodenradarmessungen wurde ein GSSI, Inc. SIR20 Messgerät mit einer 2 Gigahertz-Palm-Antenne [15] verwendet. Die Messung erfolgt in zwei rechtwinklig aufeinander stehenden Polarisationen. Die PM-, WR- und MW-Messungen wurden händisch auf einem vordefinierten Messraster mit einem Abstand von zehn Zentimetern gesammelt. Die PM-daten wurden mit einem Canin+-Korrosionsanalysesystem der Firma Proceq durchgeführt. Die Referenzelektrode ist eine Kupfersulfat-Stabelektrode [16]. Die Messung wurde nach den Vorgaben des Merkblatts B3 [1] der DGZfP durchgeführt. Die WR-Messungen wurden mit der Resipod-Sonde der Firma Proceq [17] aufgenommen und die MW-Messungen wurden mit einer ID10-Sonde der Firma HF-Sensors [18].

Die erste Kampagne auf der Bauteiloberseite umfasst 10 Messungen. Die zweite Kampagne auf der Bauteilunterseite umfasst 8 Messungen. Die Messfeldgröße ist maximal 126 mal 86 Zentimeter. Die Messzeitpunkte und der zugehörigen Probekörperzustände ist in **Tab. 1** aufgelistet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Experiment

Die Variabilität der Umgebungsbedingungen während der Messdatenaufnahme ist anhand der Zustandsparameter Korrosionsstromdichte, qualitative Feuchtigkeit und Bewehrungspotential in **Tab. 1** zusammengefasst. Der Feuchtigkeitszustand „nass“ wurde durch anstehendes Wasser auf dem Probekörper zwischen den Messungen erzeugt. Die Zustände „feucht“ und „trocken“ wurden qualitativ aus der Anschauung zum jeweiligen Messzeitpunkt bestimmt. Der Zustand „sehr trocken“ wurde durch die Lagerung des Probekörpers in einer Klimakammer bei 60° Celsius für eine Woche erzeugt.

Zur Validierung der Chlordimigration wurden Bohrkerne an den acht Positionen der Chloridmigrationssensoren (vgl. **Abbildung 1**) entnommen. Die Chloridkonzentration wurde mit Laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS) [19] untersucht. Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt von vier Masseprozent bezogen auf den Zementgehalt<sup>1</sup> herrscht in der ersten Kampagne bis in ca. zwei Zentimeter Tiefe. In der zweiten Kampagne gelang - aufgrund der höheren Betondichtigkeit - lediglich eine oberflächliche Migration bis in ca. fünf Millimeter Tiefe. An den untersuchten Stellen konnten keine erhöhten Chloridkonzentrationen in Bewehrungsebene beobachtet werden (für weitere Details siehe Völker [20]).

---

<sup>1</sup> Es existiert eine Vielzahl von Angaben zum kritischen korrosionsauslösenden Zementgehalt (Dauberschmidt, 2006). Der Wert 0,4 m% orientiert sich an der Norm DIN-EN 206.



**Tab. 1.** Zustandsparameter des Korrosionsprobekörpers.

Messdatum (Jahr Monat.Tag)	Kampagne / Zustand	Korrosionsstromdichte* (mA/m <sup>2</sup> )	Feuchtigkeit (-)	Bewehrungspotential** (mV)
2014 12.02	1/Referenz	0	trocken	-270
2015 02.19	1/gebraucht	0	nass	-330
2015 03.06	1/gebraucht	0	feucht	-325
2015 04.14	1/gebraucht	0	trocken	-290
2015 04.27	1/geschädigt	111	trocken	-330
2015 05.07	1/geschädigt	122	trocken	-340
2015 05.21	1/geschädigt	78	trocken	-320
2015 06.18	1/geschädigt	77	nass	-410
2015 08.01	1/geschädigt	82	feucht	-366
2015 11.13	1/geschädigt	23	trocken	-310
2015 11.19	2/Referenz	0	trocken	-320
2015 12.10	2/Referenz	0	trocken	-305
2016 01.18	2/Referenz	0	nass	-270
2016 01.29	2/Referenz	0	feucht	-280
2016 04.05	2/gebraucht	0	trocken	-290
2016 05.12	2/gebraucht	0	sehr trocken	-310
2016 06.03	2/geschädigt	755	trocken	-353
2016 07.12	2/geschädigt	781	nass	-347

\* Zur Berechnung wurde die Gesamtoberfläche des Korrosionsstabs zugrunde gelegt.

\*\* gemessen gegen die Mangandioxid- (MnO<sub>2</sub>) Referenzelektrode ERE 20.

### 3.2 Datenfusion

Zunächst werden sogenannte Merkmale aus den Signalen der individuellen Messverfahren extrahiert – das sind Parameter, die durch den betrachteten Defekt signifikant beeinflusst werden. Eine Liste der Merkmale ist in **Tab. 2** enthalten. Die Extraktion der Merkmale ist in Völker [20] ausführlich beschrieben. Die Merkmale werden normiert, um Vergleichbarkeit untereinander zu schaffen. Die Normierungsparameter sind in **Tab. 3** zusammengefasst.

Die Fusion erfolgt mit logistischer Regression (LR) - ein binärer Klassifikator der erstmals 1967 von Strother et al. [21] vorgestellt wurde. LR „lernt“ aus den Merkmalsatz und den dazugehörigen Labeln die Parameter einer linearen Trennfunktion zwischen *Intakten* und *Defekten* Pixeln. Im Gegensatz zu simpleren linearen Ansätzen (z. Bsp. Fisher'sche Diskriminanz-Analyse) ist LR bei der Bestimmung der Trennfunktion weniger ausreißeranfällig und somit beliebt in Anwendungen mit authentischen Messdaten. Die erlernten Parameter  $\theta$  der Trennfunktion sind in **Tab. 4** aufgelistet.

Die Evaluierung der Fusionsergebnisse in **Tab. 5** erfolgt auf Basis von TPR und FPR - ermittelt in einer k-Fold Kreuzvalidierung mit acht unabhängigen Gruppen [22]. Die Datenfusion mit LR detektiert etwa die Hälfte der Korrosionspixel bei gleichzeitig geringer Falschalarmrate.

Das beste Detektionsergebnis auf Basis eines einzelnen Merkmals wird mit der relativen Potentialänderung (Merkmal 4) erreicht. Bei einer TPR von 21 Prozent ist die Sensitivität jedoch gering. Die Detektion von Korrosionspixeln bei der schwächeren Korrosion in der ersten Kampagne (vgl. Korrosionsstromdichte **Tab. 1**) gelingt nicht.

Dem Fusionsergebnis steht die herkömmliche Detektion der Korrosionsstellen anhand des absoluten Bewehrungspotentials nach ASTM C876 [6] oder anhand der Potentialänderungen nach Merkblatt B3 [1] gegenüber. Nach ASTM-Norm existieren zwei Möglichkeiten der Ergebnisinterpretation, je nachdem ob Potentiale im Bereich zwischen -200 bis -350 Millivolt als Korrosion gewertet werden oder nicht. Wenn nicht, beträgt die TPR fünf Prozent und die TNR hundert Prozent. Falls doch betragen TPR und TNR jeweils 100, beziehungsweise 19 Prozent. Laut Merkblatt B3 können die Korrosionsstellen anhand

negativer Potentialänderung um mehrere hundert Millivolt identifiziert werden. Die maximale negative Potentialänderung im vorliegenden Datensatz beträgt jedoch circa 40 Millivolt. Die Auswertung nach Merkblatt B3 ist somit für die vorliegende Problemstellung vollkommen ungeeignet.

**Tab. 2.** Liste der verwendeten Merkmale für die Datenfusion

	ZfP-Verfahren	Messparameter
Merkmal 1	Bodenradar	Energie d. dominanten Frequenz d. Oberflächenwelle
Merkmal 2	Bodenradar	dominante Frequenz d. Oberflächenwelle
Merkmal 3	Potentialfeldmessung	Bewehrungspotential
Merkmal 4	Potentialfeldmessung	relatives Bewehrungspotential
Merkmal 5	Wenner-Sonde	Betonwiderstand
Merkmal 6	Mikrowellensensor	relative Luftfeuchte im Beton
Merkmal 7	Bodenradar	tiefenkorrigierte Bewehrungsamplitude

**Tab. 3.** Subtrahenden und Skalierungsfaktoren ( $std(f) - median(f)$ )<sup>-1</sup> für die Skalierung der Merkmale.

	Merk. 1	Merk. 2	Merk. 3	Merk. 4	Merk. 5	Merk. 6	Merk. 7
<b>Subtrahend</b> $S = median(f)$	5875	1,372	-263,790	-0,137	192,260	2,450	0,9910
<b>Skalierungs-</b> <b>faktor</b> $F = \frac{1}{std(f - S)}$	0,0011	0,855	0,0196	0,1306	0,0085	0,9720	6,9307

**Tab. 4.** Modellparameter aus der logistischen Regression.

	Theta 0	Merk. 1	Merk. 2	Merk. 3	Merk. 4	Merk. 5	Merk. 6	Merk. 7
$\Theta$	-11,23	0,134	0,17	-1,23	-2,86	-0,78	1,52	-1,69

**Tab. 5.** Sensitivität und Falschalarmrate von Fusion und Einzelverfahren

Korrosionsdetektionsverfahren	TPR	FPR
Datenfusion: LR mit 7 Merkmalen	0,49	0
Bestes LR Ergebnis für Einzelmerkmal: Merkmal 4	0,2	0
ASTM C-876 (mit 50% Risiko aufgerundet/abgerundet)	1/0,05	0,2/0
DGZfP Merkblatt B3	0	0

Die Evaluierung der Fusionsergebnisse in **Tab. 5** erfolgt auf Basis von TPR und FPR - ermittelt in einer k-Fold Kreuzvalidierung mit acht unabhängige Gruppen [22]. Die Datenfusion mit LR detektiert etwa die Hälfte der Korrosionspixel bei gleichzeitig geringer Falschalarmrate.

Das beste Detektionsergebnis auf Basis eines einzelnen Merkmals wird mit der relativen Potentialänderung (Merkmal 4) erreicht. Bei einer TPR von 21 Prozent ist die Sensitivität jedoch gering. Die Detektion von Korrosionspixeln bei der schwächeren Korrosion in der ersten Kampagne (vgl. Korrosionsstromdichte **Tab. 1**) gelingt nicht.

Dem Fusionsergebnis steht die herkömmliche Detektion der Korrosionsstellen anhand des absoluten Bewehrungspotentials nach ASTM C876 [6] oder anhand der Potentialänderungen nach Merkblatt B3 [1] gegenüber. Nach ASTM-Norm existieren zwei Möglichkeiten der Ergebnisinterpretation, je nachdem ob Potentiale im Bereich zwischen -200 bis -350 Millivolt als Korrosion gewertet werden oder nicht. Wenn nicht, beträgt die TPR fünf Prozent und die FPR null Prozent. Falls doch betragen TPR und FPR jeweils 100, beziehungsweise 20 Prozent. Laut Merkblatt B3 können die Korrosionsstellen anhand negativer Potentialänderung um mehrere hundert Millivolt identifiziert werden. Die maximale negative Potentialänderung im vorliegenden Datensatz beträgt jedoch circa 40 Millivolt. Die Auswertung nach Merkblatt B3 ist somit für die vorliegende Problemstellung vollkommen ungeeignet.

## 4 Diskussion

Mit der Kombination von beschleunigter Verwitterung und gezielter Korrosionsauslösung an einem großen Betonprobekörper wurde ein neuartiges Korrosionsexperiment vorgestellt. Die Besonderheit besteht in der Möglichkeit die ZfP-Messungen mit Datenlabeln für intakte und defekte Messpunkte zu kennzeichnen. Die Verbindung aus einem vollständigen Verwitterungszyklus und Datenlabeln ermöglicht erstmals die Verwendung von Algorithmen aus dem überwachten Maschinenlernen zur Fusion von ZfP-Daten zur Korrosionsdetektion. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial der Datenfusion gegenüber den Einzelmessungen und der Potentialfeldmethode mit Auswertung nach ASTM-C876 und DGZfP Merkblatt B3. Wegen der höheren Ansprüche an die Validierbarkeit und Generalisierbarkeit der Fusionsergebnisse ist die Entwicklung von Fusionsmethoden mit einem großen experimentellen Aufwand verbunden. Gelingt jedoch die Übertragung der Ergebnisse in die Praxis, kann Datenfusion in Kombination mit autonomen Roboterplattformen einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung vollautomatisierter ZfP-Systeme leisten. Durch ihre Entwicklung kann eine weitere Verbreitung von ZfP im Bauwesen letztlich gelingen.

## Referenzen

- [1] DGZfP B03, Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, Berlin, Deutschland: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2014.
- [2] S. Keßler, Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen – Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement, Dissertation, L. f. W. u. W. i. Bauwesen, Hrsg., München: Technische Universität München, 2015.
- [3] H. M. Jol, Ground Penetrating Radar Theory and Applications, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science BV, 2009.
- [4] W. Morris, A. Vico, M. Vazques und S. Sanchez, „Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements,“ *Corrosion Science*, Bd. 44, pp. 81-99, 2002.
- [5] W. Leschnik und U. Schlemm, „Dielektrische Untersuchung mineralischer Baustoffe in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt bei 2,45 GHz,“ in *Proceedings of Feuchttag `99 Umwelt, Meßverfahren, Anwendungen*, Berlin, Deutschland, 1999.
- [6] ASTM C876, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2015.
- [7] Force Technology, „ERE 20 reference electrode,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.forcetechnology.com/en/Menu/Products/Concrete-monitoring/Concrete-monitoring-probes/ere20referenceelektrode.htm>. [Zugriff am 12 03 2015].
- [8] B. H. Oh und S. Y. Jang, „Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures,“ *Cement and Concrete Research*, Bd. 37, pp. 47-53, 2007.
- [9] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration, West Conshohocken, PA.: ASTM International, 2012.
- [10] K. D. Stanish, R. D. Hooton und M. D. A. Thomas, „Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review,“ Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1997.
- [11] M. Stern und A. L. Geary, „Electrochemical Polarization I . A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves,“ *Journal of the electrochemical society*, Bd. 104, Nr. 1, pp. 56-63, 1957.
- [12] Sortec, „Sortec anode ladder,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.sortec.de/sensoren-sensors/anodenleiter-anode-ladder>. [Zugriff am 13 03 2015].
- [13] R. W. Revie und H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control - An Introduction to Corrosion Science and Engineering, New Jersey, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- [14] C. Gehlen, A. Burkert und G. Ebell, „Validierung zerstörungsfreier Messmethoden zur zuverlässigen Erfassung von Bewehrungskorrosion,“ Berlin, 2010.
- [15] GSSI, „GSSI 1.5 GHz Antenna Manual,“ Geophysical Survey Systems, Inc., 2005. [Online]. Available: <http://www.allied-associates.co.uk/pdfmanuals/MN31-079C%20Model%205100%20Manual.pdf>. [Zugriff am 20 01 2015].



- [16] Proceq 1, „Corrosion Analysis - Canin+,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.canin-concrete-corrosion.com>. [Zugriff am 16 08 2016].
- [17] Proceq 2, „Resipod Resistivity Meter,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.proceq.com/nondestructivetestequipment/concrete-testing/moisture-corrosion-analysis/resipod.html>. [Zugriff am 16 08 2016].
- [18] A. Göller, „hf sensor GmbH, Leipzig,“ [Online]. Available: <http://www.hf-sensor.de>.
- [19] A. E. Miziolek, Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) – Fundamentals and Applications, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [20] C. Völker, Datenfusion zur verbesserten Fehlstellendetektion bei der zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauwerken (Dissertation), Berlin: Universität des Saarlandes, 2017.
- [21] S. H. Walker und D. B. Duncan, „Estimation of the Probability of an Event as a Function of Several Independent Variables,“ *Biometrika*, Bd. 54, Nr. 1/2, pp. 167-179, June 1967.
- [22] T. Hastie, T. Robert und J. Friedman, The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction, 2. Hrsg., S. S. i. Statistics, Hrsg., New York: Springer, 2001.