

Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen Office fédéral des routes Ufficio federale delle Strade

Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Robot de mesure de champ de potentiels pour l'inspection des structures en béton armé - Détermination automatisée de l'état de corrosion

Half-cell potential mapping robot for reinforced concretes structures - Automated assessment of the corrosion state

Eidgenössische Technische Hochschule Institut für Baustoffe (IfB) Prof. Dr. B. Elsener Prof. Dr. U. Angst Patrick Pfändler Oliver Glauser

Forschungsprojekt AGB 2012/011_OBF auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Oktober 2018

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen Office fédéral des routes Ufficio federale delle Strade

Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Robot de mesure de champ de potentiels pour l'inspection des structures en béton armé - Détermination automatisée de l'état de corrosion

Half-cell potential mapping robot for reinforced concretes structures - Automated assessment of the corrosion state

Eidgenössische Technische Hochschule Institut für Baustoffe (IfB) Prof. Dr. B. Elsener Prof. Dr. U. Angst Patrick Pfändler Oliver Glauser

Forschungsprojekt AGB 2012/011_OBF auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Oktober 2018

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung Prof. Dr. B. Elsener

Mitglieder

Prof. Dr. U. Angst Patrick Pfändler Oliver Glauser

Begleitkommission

Präsident Dr. M. Käser

Mitglieder

Prof. Dr. U. Angst Prof. Dr. W. Kaufmann Prof. Dr. A. Kenel Dr. K. Schellenberg Dr. M. Alvarez

Antragsteller

Arbeitsgruppe Brückenforschung

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von http://www.mobilityplatform.ch heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum Zusammenfassung Résumé Summary	4 7 9 11
1	Einleitung/ Zielsetzung	13
2	Grundlagen der Potentialfeldmessung	15
3	Bauwerksinspektion mit Robotern (Literatur)	17
3.1	BETOSCAN	1/
3.2		18
3.3	Bruckeninspektionsroboter mit Risserkennung	19
3.4	RoboSense	20
3.5	Clouisci	20
4	C2D2 Roboter – Entwicklung	22
4 // 1	Linwandlung des Paraswifts	23
4.1	Erster Prototyn des C2D2	25
4.2 1 2	Radelektrode	26
4.2.1	Elektronik auf dem C2D2	20
423	Laufzeit und Vortexantrieb	28
4.2.4	Lokalisierung und Steuerung	28
4.2.5	Messcomputer und GUI	31
4.2.6	Delaminationssensor	32
4.3	Patentantrag für die Radelektrode	36
5	Anwendung auf Bauwerken	37
5.1	Testflächen	37
5.1.1	Garagenkipptor	37
5.1.2	Widerlagerwände in Luterbach	40
5.1.3	Untersicht einer Brückenplatte an der Gotthardpassstrasse	47
5.1.4	Tunnelwände an Portalen der Gotthardpassstrasse	49
5.1.5	Einsteinbrücke	57
5.2	Moglichkeiten und Grenzen des Inspektionsroboters	61
5.2.1	Fortbewegung und Platzierung am Bauwerk	61
5.2.2	Lokalisierung des G2D2	63
5.2.3 5.2.4	Vieuelle Aufnehme der Oberfläche	64 65
0.2.4 5.2.5	Cowicht des Pahotore	66
526	Datenverbindung	66
5.2.7	Auf-und Abbau und Betrieb des Systems	67
0.2.1		0.
6	Resultate der Potentialfeldmessungen	69
6.1	Europabrücke	69
6.1.1	Steg der Europabrücke	70
6.1.2	Untersicht der Kragplatte	73
6.1.3	Kastenboden	74
6.2	Gotthardpassstrasse	75
6.2.1	Untersicht der Galerie	75
6.2.2	Gotthard Galerie Messung	79
6.2.3	Galeriewand an der Gotthardpassstrasse	80

7	Auswertung Potentialfeldmessdaten	83
7.1	Festlegung der Grenzwerte	83
7.1.1	Grenzwerte nach ASTM	
7.1.2	Grenzwerte nach RILEM	
7.1.3	Grenzwerte nach SIA 2006	
7.2	Halbautomatische Auswertung	
7.2.1	Zweck der halbautomatischen Auswertung	
7.2.2	Curve-Fitting Verfahren	85
7.2.3	Entwickelter Algorithmus für die halbautomatische Auswertung	86
7.3	Ausgewählte Beispiele zur halbautomatischen Auswertung	91
7.3.1	2 Gaussverteilungen am Steg der Europabrücke	91
7.3.2	Widerlagerwand in Luterbach - eine Gaussverteilung	93
7.3.3	Portal Mitte an der Gotthardpassstrasse - 3 Gaussverteilungen	94
7.4	Vorteile und Schwierigkeiten bei der halbautomatischen Auswertung	96
8	Umsetzung	101
81	Vorgehensweise für die Umsetzung an Bauwerken	101
8.2	Schlussfolgerung	101
	Anhänge	
	Glossar	

G1055ai	123
Literaturverzeichnis	124
Projektabschluss	127
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	130

Zusammenfassung

Das Interesse, Inspektionsarbeiten oder Zustandserfassungen an Infrastrukturbauten teilweise oder gänzlich durch Roboter zu erledigen, ist seit Jahrzehnten vorhanden, sei dies aus Gründen fehlender Zugänglichkeit oder aus Zeit- und Kostengründen. Aufgrund der Variabilität der Bauwerke wurden unterschiedliche Robotersysteme entwickelt, diese unterscheiden sich in der Art der Fortbewegung, der Anzahl und des Typs der mitgeführten zerstörungsfreien Prüfsensoren als auch im geplanten Einsatzzweck. Das Institut für Baustoffe (IfB) der ETH Zürich entwickelte in Zusammenarbeit mit dem Autonomous Systems Lab (ASL) der ETH einen Prototypen eines Inspektionsroboters C2D2 (climbing corrosion detection device) für den Einsatz an Stahlbetontragwerken mit einer Radelektrode für die Aufnahme von Potentialfeldmessdaten. Der Roboter C2D2 kann sich an Wänden und überhängenden Flächen bewegen und das Potential der Bewehrung erfassen. Die Potentialfeldmesstechnik erlaubt die zerstörungsfreie Detektion der (chloridinduzierten) Bewehrungskorrosion von der Betonoberfläche aus. Die Korrosion der Bewehrung, Hauptursache für Schäden an Stahlbetonbauten, kann so frühzeitig und lang vor einer visuellen Inspektion entdeckt werden. Vor dem Hintergrund dass die Kosten der Instandsetzungsarbeiten mit später erfolgenden Intervention deutlich steigen könnte eine effiziente, frühzeitige Detektion der Korrosion auch Kosten sparen.

Der Schwerpunkt dieses Forschungsauftrages lag beim Einsatz des C2D2 Roboters an Bauwerken in der Praxis um so die Möglichkeiten und Grenzen zu eruieren. Insbesondere ein Einsatz an komplexeren Bauwerken mit rauen Flächen, Rissen und sonstigen Unregelmässigkeiten an der Betonfläche sollte getestet werden. Im ersten Teil des Forschungsberichtes wird kurz die Potentialfeldmesstechnik und einige bereits im Bauwesen angewandte Inspektionsroboter vorgestellt. Weiter wird die Entwicklung des C2D2 von einem Showroboter (Paraswift) zu einem Inspektionsroboter und die Einsätze auf verschiedensten Praxisobjekten dokumentiert. Es zeigte sich, dass der C2D2 Roboter mit Vortexantrieb auf gekrümmten, eher verschmutzten oder rauen Betonoberflächen insbesondere in grösseren Höhen (Gewicht des Verbindungskabels) Schwierigkeiten mit der Traktion aufwies. Ebenfalls noch verbesserungsbedürftig ist das im Prinzip funktionierende System der Ortung des Roboters auf der Bauteiloberfläche. Die Entwicklung der fliegenden Drohnen in den letzten Jahren hat den C2D2 Inspektionsroboter technologisch überholt. Ein als ETH Grant finanziertes Nachfolgeprojekt am IfB und ASL der ETH Zürich befasst sich nun mit der Entwicklung einer Drohne zur Aufnahme von Potentialfeldmessdaten an Bauwerken. Damit wird die Bedeutung der ursprünglichen Idee eines Inspektionsroboters bestätigt und auf einer neuen Plattform weitergeführt.

Der zweite und umfangreichere Teil der vorliegenden Forschungsarbeit befasst sich mit der Entwicklung einer geeigneten Routine zur halbautomatischen Auswertung der Potentialmessdaten. Dies mit dem Ziel, deutlich rascher als heute Resultate zu erhalten, welche den Ingenieur in der Interpretation des Korrosionszustands unterstützen. Die Routine basiert auf der Annahme einer statistischen Verteilung der Potentialdaten und somit einer klaren mathematischen Grundlage. Der Algorithmus umfasst eine grafische Darstellung der aufgezeichneten Daten als Potentialfeld, die statistische Analyse der Daten mit der Bestimmung der Grenzwerte für Korrosion und passive Bewehrung, und eine grafische Darstellung der Korrosionswahrscheinlichkeit. Die halbautomatische Auswertung der Potentialmessdaten von unterschiedlichen Infrastrukturbauwerken ist im Bericht an zahlreichen Beispielen dokumentiert. Es zeigte sich, dass in vielen Fällen zwei Gaussverteilungen, eine für die passive und eine für die korrodierende Bewehrung, für die Auswertung genügten. Der entwickelte Algorithmus ist auch in der Lage autonom drei Gaussverteilungen (korrodierend, passiv feucht und passiv trocken) zu implementieren und die Korrosionswahrscheinlichkeit zu berechnen und darzustellen.

Die entwickelte Routine zur halbautomatischen Auswertung kann Potentialfeldmessdaten unabhängig von der Art der Erfassung (von Hand oder mit einem Roboter) auswerten und liefert als Resultat eine grafische Darstellung der Korrosionswahrscheinlichkeit des ausgemessenen Bauteils. Da die Korrosionswahrscheinlichkeit und ihre grafische Darstellung als Karte nicht vom Absolutwert des Potentials abhängt, eignet sich diese Darstellung sehr gut um die Entwicklung des Korrosionszustands über die Zeit zu verfolgen. Der zuständige Ingenieur oder die Fachperson Potentialmessungen wird mit der Analyse unterstützt und kann sich auf die bauteilspezifische Interpretation im Kontext weiterer Daten (Überdeckung der Bewehrung, Chloridprofile) konzentrieren.

Der Einsatz der halbautomatischen Auswertung an Datensätzen unterschiedlicher Bauwerken zeigte sich zwar robust gegenüber zahlreichen äusseren Einflüssen, könnte bei einem Nachfolgeprojekt nochmals verfeinert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Datengrundlage mit weiteren Messdaten von zerstörungsfreien oder zerstörenden Prüfverfahren zu ergänzen um die Aussagekraft der Auswertung zu erhöhen. Für weitere Inspektionsroboter empfiehlt es sich auf eine fliegende Plattform (Drohne) umzusteigen. Ein fliegender Roboter als Trägerplattform kann das bestehende Manko der Traktion umgehen und ermöglicht eine Aufnahme von Flächen im geforderten Messraster selbst an unzugänglichsten Stellen an Stahlbetontragwerken.

Résumé

Les méthodes traditionnelles d'inspection de l'état de dégradation des structures en béton armé sont limitées pour des raisons d'accessibilité et de coûts de main d'œuvre. Ceci explique le nombre d'approches novatrices impliquant des robots pour l'inspection de structures de génie civil. Ces robots diffèrent par leur mobilité, leur méthode de fonctionnement, le nombre et le type de capteurs utilisés et leur champ d'application. L'institut des matériaux de construction (IfB) de l'ETH Zurich a développé en collaboration avec le laboratoire de système autonomes (ASL) un robot d'inspection, le C2D2 (climbing corrosion detection device). Grâce à son principe d'adhésion vortex le C2D2 peut accéder et se mouvoir sur des surfaces à accès délicats comme des surfaces verticales ou sous le tablier d'un pont à des hauteurs importantes. Une électrode rotative est embarquée sur le C2D2 et permet de mesurer le potentiel de demi-cellule à la surface du béton. Cette technique de cartographie du potentiel de demi-cellule permet de détecter la corrosion des armatures (principale cause de détérioration) de manière fiable, non destructive et à un stade précoce en amont d'une détection par inspection visuelle. Etant donné que les coûts de remise en état augmentent nettement lors d'une intervention tradive, une détection précoce de la corrosion permettra aussi de réduire les coûts d'entretien.

La première partie de ce projet de recherche portait sur l'utilisation du robot C2D2 sur des structures en béton armé réelles avec des surfaces rugueuses, des fissures ou d'autres irrégularités afin de voir les possibilités et les limitations de ce modèle et ensuite de l'améliorer. Tout d'abord, le principe de la technique de mesure du potentiel de demicellule et plusieurs robots d'inspection documentés dans la littérature sont présentés. Ensuite le développement du C2D2 à partir d'un robot de démonstration (Paraswift) jusqu'à un robot d'inspection est documenté. Le rapport montre que l'utilisation du C2D2 et de son système de vortex est délicat, voire impossible, sur des surfaces sales, très rugueuses ou courbées à cause de problèmes d'adhésion, de traction et de localisation. Ces difficultés augmentent avec une hateur d'intervention plus importanté en raison du poids des câbles de connexion. Le système de localisation de la position du robot sur la structure fonctionne en théorie mais doit être amélioré afin d'être plus fiable. Pour résumer, ces difficultés et le développement rapide des drones ont rendus le robot C2D2 et sa technologie vortex obsolète. Un projet commun des deux instituts de l'ETH Zurich (IfB and ASL), financé par une bourse ETH, gère le développement d'un drone équipé d'un capteur électrochimique pour la mesure du potentiel de demi-cellule à la surface de structures en béton armé. Ainsi, le principe d'une inspection robotisée est confirmé mais avec une nouvelle technologie.

La deuxième partie, plus longue et plus importante de ce projet de recherche était dédiée au développement d'une procédure mathématique adaptée pour une analyse semiautomatique des données de potentiels mesurés. L'objectif était de déterminer les possibles zones qui souffrent de corrosion d'une manière fiable et rapide pour aider l'ingénieur responsable de l'évaluation de l'état de la structure. La procédure est basée sur la supposition d'une distribution statistique des potentiels correspondant aux armatures passives (intactes) et actives (souffrant de corrosion). Ensuite, à l'aide d'un ajustement de courbe de l'histogramme des potentiels, la procédure calcule pour une valeur de potentiel donnée la probabilité que cette valeur corresponde à un potentiel passif ou actif. L'algorithme développé comprend l'analyse statistique des données déterminant les valeurs frontières des potentiels passifs et actifs, une représentation graphique du champ de potentiel et une représentation graphique de la probabilité de corrosion. Cette procédure semi-automatique a été testée sur un grand nombre de structures en béton armé différentes. Il a été montré que dans la plupart des cas deux distributions gaussiennes étaient suffisantes pour l'analyse du champ de potentiel. L'algorithme développé peut également gérer l'ajout d'une troisième distribution (active, passive humide et passive sèche).

La procédure pour une évaluation semi-automatique peut être utilisée pour n'importe qu'elles données de potentiel de demi-cellule, indépendamment de leur mode

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

d'acquisition (manuellement ou avec un robot). L'analyse fournit une représentation graphique de la probabilité de corrosion de n'importe quelle partie de la structure inspectée. Cette probabilité et sa représentation étant indépendantes de la valeur absolue des potentiels mesurés, cette représentation permet un suivi de l'évolution de l'état de la corrosion de la structure au cours du temps. En se basant sur cette analyse et son évaluation de l'état de la corrosion, l'ingénieur ou la personne spécialisée responsable de la structure (Fachperson Potentialfeldmessung) pourra se concentrer sur l'interprétation de données complémentaires (épaisseur de béton, profil de concentration en chlorures).

L'utilisation de l'évaluation semi-automatique sur des ensembles de données de structures différentes s'est avérée robuste face à de nombreuses influences extérieures mais pourrait être améliorée dans le cadre d'un projet suivant. Dans le but d'améliorer la fiabilité de l'évaluation semi-automatique, il est aussi possible de compléter les séries de données avec de nouvelles mesures provenant de méthodes destructives ou non-destructives. Pour les prochains robots d'inspection, il est recommandé de passer à des modèles volants (drones). Un drone permet d'éviter le manque d'adhérence. Cela rend possible l'inspection, avec la grille de mesure désirée, des zones les plus inaccessible des structures en béton armé.

Summary

The current manner of assessing the corrosion condition of reinforced concrete structures is limited due to lack of accessibility of part of the structures and it is expensive due to the high involvement of manpower. That's why a number of approaches involving robots for inspection of engineering structures can be found in the literature. These robots differ in the type of tracking systems, the number and types of sensors and in the scope of their use. The Institute of Building Materials (IfB) and the Autonomous System Lab (ASL) of ETH Zurich developed a prototype of an inspection robot, the C2D2 (climbing corrosion detection device). Due to its Vortex adhesion principle the C2D2 robot can move around on walls and also at the underside of bridges. The C2D2 platform contained a small wheel electrode to measure half-cell potential data on reinforced concrete structures. This well established half-cell potential mapping technique can detect corrosion of the reinforcement (the main cause for deterioration of reinforced structures) reliably, nondestructively and in a very early stage, long before visual signs of corrosion appear on the concrete surface. Facing the huge challenges related to the ageing of our built infrastructures and the expected steep rise in deteriorating structures over the coming decades, an efficient early detection of corrosion will reduce the high costs.

The first part of this research project was to apply and test the C2D2 robot in practice on a variety of real reinforced concrete structures with rough surfaces, cracks and other irregularities on the concrete surface in order to see possibilities and limitations, get experience and adapt improvements. First the principle of the half-cell potential technique and several inspection robots documented in literature are presented. Then the development of C2D2 from a show device (Paraswift) to the inspection robot is shown. The use of C2D2 on different real structures in practice is documented. It is shown that use of C2D2 with its Vortex system on dirty, very rough or curved surfaces becomes increasingly difficult or impossible due to difficulties both in the adhesion and tracking. These difficulties increased with increasing height of operation due to the weight of the connection cables. The system for the location of the position of the robot on the structure in principle was working but should be improved to become more reliable. Summarizing, these difficulties on one side and the rapid development of flying drones on the other side made C2D2 with the vortex platform technologically obsolete. A joint follow up project of the two institutes at ETH Zurich (IfB and ASL) financed by an ETH grant deals with the development of a drone equipped with a potential sensor for measuring half-cell potential data on structures. The idea of a robotic condition assessment is confirmed but continues on a new platform.

The larger and more important part of the research work was dedicated to the development of a suitable mathematical procedure for the semi-automatic analysis of half-cell potential data. The goal was to get the results of the areas of ongoing corrosion in a rapid and robust way in order to help the responsible engineer in the interpretation of the corrosion state of the structure. The procedure is based on the assumption of Gaussian distribution of the passive and corroding half-cell potential data and it calculates with curve fitting of the histogram of the potentials the probability of a given potential value belonging to the corroding or the passive state, thus it has a clear mathematical basis. The algorithm developed includes a graphical representation of the potential field, the statistical analysis of the data determining boundary values for passive and active state and a graphical representation of the corrosion probability that can be compared with the original potential field. This semi-automatic procedure has been tested and documented on a large number of different reinforced concrete structures. It was shown that in most cases two Gaussian distributions are sufficient for the analysis of the potential field. The algorithm developed can handle in the same way also three distributions (corroding, passive humid and passive dry).

The procedure for a semi-automatic evaluation can be used for all half-cell potential data, independent on the way of their acquisition (manually of with a robot). The analysis provides a graphical representation (map) of the corrosion probability on any part of the structure that was inspected. Because the probability of corrosion and their

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

representation as a map is independent on the absolute value of the potential this representation is very well suited to follow the evolution of the corrosion state of the structure with time. Based on this analysis and evaluation of the corrosion state the responsible structural engineer or specialized personal (Fachperson Potential-feldmessung) can focus on the interpretation of the specific structure in the context of additional data (concrete cover depth, chloride concentration depth profiles).

The use of semi-automatic evaluation on datasets of different structures proved to be robust against numerous external influences but could be further refined in a follow-up project. In addition, it is possible to supplement the data basis with further measurement data from non-destructive or destructive test methods in order to increase the significance of the evaluation. For further inspection robots, it is recommended to switch to a flying platform (drone). A flying robot as a carrier platform can circumvent the existing lack of traction and makes it possible to record surfaces in the required measuring grid even at the most inaccessible points on reinforced concrete structures.

1 Einleitung/ Zielsetzung

Die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung ist die Hauptursache für kostspielige Erhaltungs- und Instandsetzungsmassnahmen an bestehenden Infrastrukturbauten, wie beispielsweise Stahlbetonbrücken. Die Schäden an der Bewehrung sind häufig durch den Gebrauch von Tausalzen in den Wintermonaten zurückzuführen und betreffen vor allem die oberflächennahen Lagen der Bewehrung. Die Inspektion wird mit zunehmender Bauwerksalter immer wichtiger, da die finanziellen Mittel für den Unterhalt und Instandsetzung stets ansteigen um vorhandene, bereits bekannte Mängel zu beheben. Heutzutage werden die Bauwerke zwar regelmässig inspiziert, aber häufig nur visuell. Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass mit der visuellen Inspektion die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrungseisen nicht oder erst im fortgeschrittenen Stadium erkannt wird. Deshalb erfolgen erste Instandsetzungsmassnahmen häufig zu spät und sind im Vergleich zur rechtzeitigen Intervention deutlich kostspieliger. Eine Abschätzung der erforderlichen Brückeninstandsetzungen in den Niederlanden kommt zum Schluss, dass sich diese Anzahl in den nächsten 20 Jahren um einen Faktor 2 bis 4 erhöhen wird [1]. Um diesen unausweichlichen Anstieg der Unterhaltskosten in den kommenden Jahren zu mildern, muss die Zuverlässigkeit dieser regelmässigen Inspektionen erhöht werden, um den optimalen Zeitpunkt für eine Intervention zu bestimmen.

Mittels der bekannten Potentialfeldmessung kann der Zustand der Bewehrung zerstörungsfrei von der Betonoberfläche aus gemessen werden [2]. Der Einsatz dieser Methode ist heute vergleichsweise zeitintensiv und teuer. Deshalb wird die Potentialfeldmessung bei regelmässigen Inspektionen höchst selten eingesetzt. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Bereiche von Infrastrukturbauten schwer zugänglich sind und somit den Einsatz von Hebebühnen oder ähnlichen Geräten erforderlich machen. Der Einsatz von schweren Geräten erhöht die direkten und indirekten Kosten und führt je nach Fall zu einer ungewollten Beeinträchtigung des Verkehrs durch eine Sperrung des Abschnittes oder kompletten Fahrspur. Daher wird die Potentialfeldmessung erst eingesetzt, wenn der Entscheid für eine Instandsetzung im Zuge der detaillierten Überprüfung [3] gefällt ist. Zu diesem Zeitpunkt sind in der Regel die Schäden schon an der Betonoberfläche sichtbar und die Korrosionsschäden an der Bewehrung bereits weit fortgeschritten.

Die beiden Institute IfB und ASL haben im Vorfeld dieses Forschungsauftrages einen Prototyp eines Inspektionsroboters entwickelt der in der Lage ist, Potentialmessdaten aufzuzeichnen. Dies erlaubt eine Zustandserfassung an für Menschen schwer zugänglichen Stellen, da sich der Roboter mit dem Vortexantrieb an beliebig orientierten Betonoberflächen bewegen kann. Im Verlauf des Projektes soll der Prototyp an unterschiedlichen Bauwerkstypen eingesetzt und anhand dieser Praxiserfahrungen iterativ verbessert werden. Der Inspektionsroboter soll Fortschritte bezüglich der Qualität der Informationen und der Kosten erzielen. Mit zunehmender Menge an Daten verschiebt wird der Aufwand für die Auswertung grösser. Deshalb soll eine Routine für die halbautomatische Analyse und erste Interpretation der Potentialmessdaten entwickelt werden. Dieser wichtige Teil des Forschungsprojekts kann für jegliche Art von Potentialmessdaten, auch konventionell gemessene, verwendet werden. Die aggregierten Resultate können möglicherweise in einem weiteren Schritt in ein Bauwerksmanagement System eingespiesen werden könnte.

Ein Bauwerksmanagement, welches über in regelmässigen Abständen erhobene, flächendeckende Informationen über die Entwicklung des Korrosionszustandes der Bewehrung verfügt, könnte die Kosten für die Instandsetzung reduzieren. Dies würde in Zukunft eine realistische Abschätzung des finanziellen Aufwandes für die Instandsetzung ermöglichen. Auf dieser Basis wäre eine effizientere Allokation der vorhandenen, begrenzten Ressourcen möglich. Sowie signifikant bessere Abschätzung der zukünftigen Entwicklung eins Bauwerks oder des gesamten Bestandes an Stahlbetonbauwerken wäre möglich.

2 Grundlagen der Potentialfeldmessung

Die Einführung der Potentialfeldmessung Mitte der 1980-er Jahren führte zu einer signifikanten Verbesserung der zerstörungsfreien Zustandserfassung von Stahlbetontragstrukturen. Die Grundlage für diese qualitative Messmethode liefert die Elektrochemie. Der Korrosionsprozess an der Bewehrung besteht aus einer anodischen und einer kathodischen Teilreaktion, welche das Korrosionspotential (Mischpotential) bestimmen. Aus Gründen der elektrischen Neutralität müssen die anodische und die kathodische Teilstromdichte gleich gross sein. [2]

Anodische Teilreaktion:

Kathodische Teilreaktion:

Fe → Fe²⁺ + 2 e⁻ H₂O + $\frac{1}{2}$ O₂ + 2 e⁻ → 2OH⁻ Fe + H₂O + $\frac{1}{2}$ O₂ → Fe(OH)₂

Gesamtreaktion:

An einem Bewehrungseisen wird die korrodierende Stelle zur Anode. Die Stellen auf dem Bewehrungseisen mit intakter Passivschicht bilden die kathodischen Bereiche (Kathode). Die Passivschicht bildet sich spontan an der Oberfläche des Bewehrungsstahls durch das alkalische Milieu des Porenwassers im Beton. Die nebeneinanderliegenden passiven und korrodierenden Oberflächen des Stahls bilden ein Makroelement mit einem Stromfluss. Die Anodenoberfläche ist im Vergleich zur Kathodenoberfläche deutlich kleiner und wird von den kathodischen Bereichen umgeben. Dies hat zur Folge, dass der Korrosionsangriff lokal stark beschleunigt wird. Der Metallabtrag führt zu einem lokalen Querschnittsverlust am Bewehrungseisen. Die anodische Teilreaktion ist die Ursache für Schäden am Betonstahl bei der chloridinduzierten Korrosion, jedoch kann diese Reaktion nur ablaufen, wenn gleichzeitig die kathodische Reaktion mit derselben Stromstärke abläuft. In chloridhaltiger Betonporenlösung wird das primäre Korrosionsprodukt Eisenhydroxid Fe(OH)2 durch Eisenchloridkomplexe in Lösung gehalten, es bildet sich kein Rost im Bereich der Anoden. An den Stromfluss im Makroelement ist ein elektrisches Feld gekoppelt, welches von der Oberfläche aus zerstörungsfrei mit der Potentialfeldtechnik gemessen wird. Der Potentialfeldmesswert ist die Spannungsdifferenz zwischen dem Potential einer stabilen Referenzelektrode und dem Potential der Bewehrung.

Als Referenzelektrode (eine Halbzelle) kann zum Beispiel eine Kuper/Kupfersulfat-Elektrode (Cu/CuSO₄) mit bekannter und konstanter Zellspannung eingesetzt werden. Somit kann das Potential der Bewehrung bestimmt werden und erlaubt es, Rückschlüsse auf den aktuellen Korrosionszustand der Bewehrung zu erhalten. Im Allgemeinen deuten deutlich negativere Potentiale gegenüber der Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode auf eine korrodierende Stelle hin. Der Messaufbau der Potentialfeldmessung ist der Abb. 1 dargestellt. Aus diesem Schema wird klar, dass an einer Stelle ein elektrischer Anschluss an die Bewehrung erforderlich ist, um die Potentialfeldmessung zu ermöglichen. Weiter muss die Bewehrung elektrisch vollständig vermascht sein. Zwischen der Referenzelektrode und dem Bewehrungsanschluss ist ein Spannungsmessgerät zwischengeschaltet. Eine weitere Voraussetzung für eine erfolgreiche Potentialfeldmessung ist, dass keine isolierenden Schichten vorhanden sind. Deshalb müssen bei Brückendecks die Fahrbahnbeläge und darunterliegende Abdichtungsschichten vorgängig entfernt werden. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren heute bei Brücken einzig im Rahmen von Erhaltungs- oder Erneuerungsmassnahmen eingesetzt.

 Referenzelektrode
 Spannungsmessgerät

 Referenzelektrode
 Ewehrungsanschluss

 Bewehrungsanschluss
 Korrosionsstelle

 Stromlinien
 Isopotentiallinien

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Abb. 1 Messaufbau für die Bestimmung des Bewehrungspotentials: Der Ionenstrom im Beton (durchgezogene Linie) führt zu einem Spannungsfall (gestrichelte Linie), welcher an der Betonoberfläche gemessen werden kann [4]

Durch das systematische Verschieben der Referenzelektrode entlang eines Messrasters kann die Potentialverteilung über die gesamte Bauteiloberfläche oder Bauwerk bestimmt werden. Somit lassen sich Bereiche mit positiveren und negativeren Potentialwerten identifizieren. Mittels der Differenzen (Gradienten) können korrodierende Bereiche lokalisiert werden. Die gemessenen Potentiale werden durch verschiedene Faktoren wie Betonüberdeckung, Feuchte, Chloridgehalt und Karbonatisierung beeinflusst, daraus resultiert eine Potentialverschiebung in positive oder negative Richtung gegenüber der Referenzelektrode. Die Potentialverschiebung ist aus diesen Gründen abhängig von der Exposition der Betonoberfläche und dem Messzeitpunkt.

Ein wichtiger Einflussfaktor ist die Betonüberdeckung, da mit zunehmendem Abstand zwischen der Referenzelektrode vom Bewehrungseisen die an der Oberfläche gemessenen Potentiale der Anode und der Kathode immer näher beieinanderliegen (Abb. 1). Das Auffinden von kleinen Korrosionsstellen bei grosser Betonüberdeckung erfordert demnach ein deutlich feineres Messraster. Ein weiterer Einflussfaktor ist der elektrische Widerstand des Betons, welcher den elektrolytischen Stromfluss beeinflusst und von der Feuchte abhängt. Ein hoher elektrischer Betonwiderstand - unter der Annahme einer gleichbleibenden Betonüberdeckung - erzeugt stärkere Gradienten beim Potentialfeld als ein kleinerer Betonwiderstand. Generell führt eine hohe Betonfeuchte zu einem Abfall der gemessenen Potentiale. Mit erhöhtem Chloridgehalt ergibt sich ebenfalls eine Verschiebung hin zu negativeren Potentialwerten. Durch die Kombination Korrosion, feuchte und chloridhaltige Bereiche lässt sich die chloridinduzierte lokale Korrosion sehr gut orten.

Die gemessenen Potentiale können nach der Aufnahme für die Analyse und Interpretation unterschiedlich dargestellt werden wie beispielsweise als Histogramm oder Farbenplot entsprechend dem Potentialwert. Eine weitergehende Analyse lässt Rückschlüsse auf den Ort möglicher Korrosionsherde zu. Bei der Auswertung muss zwingend die Exposition des Bauwerks oder des Bauteils mit einfliessen. Ein klares Konzept bei der Zustandserfassung schliesst zusätzliche Sondierfenster und/oder Chloridanalysen zur Bestimmung der Korrosionsherde mit ein. Wichtig ist, dass die Potentialfeldmessung keine Messung der Korrosionsgeschwindigkeit ermöglicht. [2], [4]

3 Bauwerksinspektion mit Robotern (Literatur)

Die ersten Versuche zur Entwicklung eines Roboters zur Inspektion von Bauwerken wurden in den 1980er Jahren unternommen, nachdem es am 28. März 1979 im Kernkraftwerk «Three Mile Island» eine partielle Kernschmelze gab. Die Roboter wurden mit dem Ziel entwickelt, die Risiken für eine radioaktive Verstrahlung bei der Inspizierung des Kraftwerkes durch Menschen zu minimieren. Diese Robotersysteme wurden von William Whittaker an der Carnegie Mellon Universität entwickelt. Weitere Versuche die zeitraubenden Inspektionsarbeiten mit Robotern zu automatisieren, wurden in den darauffolgenden Jahren in vielen Ländern unternommen. [6]

Der technologische Fortschritt in den letzten Jahren hat zu einer rasanten Entwicklung in der Robotertechnologie geführt. Es wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen Robotern zur Unterstützung bei Bauwerksinspektionen entwickelt [6]. Diese Systeme erfüllen Aufgaben an für Menschen gefährlichen oder schwer zugänglichen Stellen mit vielfältigen Fortbewegungsarten und sollen die Arbeit für den Menschen vereinfachen oder beschleunigen. Die Fortbewegungsarten können zum Beispiel in die folgenden Kategorien eingeteilt werden: fliegend, kletternd oder fahrend auf Rädern oder Raupen. Die Roboter sind mit zahlreichen dem Zweck und dem Ziel der Inspektion angepassten zerstörungsfreien Sensoren bestückt. Die Sensoren können beispielsweise einfache Kameras, Laser oder Radare sein. Gegenwärtig werden die einzelnen Systeme weiterentwickelt und optimiert. [7]

Eine grosse Hürde bei der Aufnahme von Daten von bestehenden Bauwerken besteht in der immensen Variabilität der Bauwerke. Einerseits in der Form und Grösse, andererseits in der Oberflächenbeschaffenheit, welche durch unsaubere Ausführung oder grössere Kalkausblühungen, deutliche Unebenheiten aufweisen kann oder durch Verschmutzungen oder andere Umwelteinflüsse beeinflusst wird. Weitere Hindernisse an Bauwerken können bauwerksbedingt sein: unterhalb von Brücken befinden sich häufig Entwässerungsleitungen oder Einstiegsluken bei Hohlkastenbrücken. Folglich weisen die in diesem Kapitel vorgestellten Inspektionsroboter eine grosse Anzahl an unterschiedlichen Antriebsarten auf, welche stets ein Kompromiss zwischen Erreichbarkeit sämtlicher Stellen am Bauwerk darstellen und zwischen der maximalen Traglast des Systems darstellen.

Spezifische Robotersysteme zur Untersuchung von Stahlbetonbauwerken, insbesondere Brücken, wurden beispielhaft in Deutschland [8] oder Korea [9] entwickelt. Einige dieser Robotersysteme sind bereits kommerziell erhältlich. Sämtliche Roboter sind mit zerstörungsfreien Materialprüfverfahren ausgestattet. Diese Robotersysteme versprechen erhöhte Objektivität und bessere Reproduzierbarkeit der Resultate als bei konventionellen Aufnahmen per Hand.

3.1 BetoScan

Der Inspektionsroboter BetoScan (Abb. 2) wurde ab dem Jahr 2008 in Deutschland entwickelt, daran beteiligt waren die Bundesanstalt für Materialforschung und – Prüfung (BAM), das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZPF) und das Institut für Bauforschung, Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite (ibac) der Universität Aachen. Der geplante Einsatzzweck dieses Roboters sind grosse ebene Betonflächen, wie dies Parkdecks oder Brücken darstellen, welche der Roboter autonom und effizient inspizieren kann. Die ursprüngliche Idee war es, einzelne zerstörungsfreie Prüfverfahren zu kombinieren und daraus resultierende Synergien bei der gleichzeitigen Aufnahme zu nützen. Aufgrund dessen ist der BetoScan vergleichsweise gross und schwer; er kann mit einer beträchtlichen Anzahl an Sensoren ausgestattet sein und dient als selbstnavigierendes Trägersystem. Die folgenden Sensoren können modular auf das Trägersystem montiert werden: 692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

- Mikrowellen zur Analyse der Feuchteverteilung
- Ultraschall zur Bestimmung von Hohlräumen und Bauteildicken
- Temperatur- und Luftfeuchtemessung
- Optische Analyse mit Kameras zur Rissmessung und zur Analyse von Rissverläufen
- Potentialfeldmessung zur Bestimmung der Korrosionswahrscheinlichkeit
- Wirbelstromsensor und Radare zur Ortung der Bewehrung und zur Messung der Betonüberdeckung
- Elektrodenräder für die Differenzpotentialfeldmessung

Das System ist in der Lage einige hundert Quadratmeter Betonoberfläche während eines Tages zu scannen und die Messungen zu verorten. Die Routenwahl des Roboters basiert auf einem Algorithmus, welcher in einem ersten Schritt die zu prüfende Umgebung abfährt und danach die optimale Route berechnet, um die Fläche komplett und schnellstmöglich abzufahren. [8]



Abb. 2 BetoScan, selbstnavigierende Roboterplattform mit zerstörungsfreien Prüfsensoren zur Zustandserfassung von grossen horizontalen Stahlbetonflächen [11]

3.2 RABIT

Die amerikanische Behörde Federal Highway Administration (FHWA) hat während eines Projektes im Jahr 2011 zur Untersuchung des Langzeitverhaltens von Brücken einen Roboter namens RABIT (Abb. 3) entwickelt um effizient und objektiv unterschiedlichste Daten zu sammeln. Der Name RABIT ist eine Abkürzung und steht für Robotics Assisted Bridge Inspection Tool. Die Ziele des Projektes sind aus den erhaltenen Daten Rückschlüsse auf die kommende Entwicklung des Bauwerks zu ziehen und aufbauend Lebenszykluskostenmodelle zu erstellen. Die Hauptanwendung dieses Roboters sind Brückenplatten, da dies grosse ebene Betonflächen darstellen. Die Leistungsfähigkeit des Inspektionsroboters beträgt zwischen 300 und 350 m² inspizierte Brückenoberfläche pro Stunde.

Auf dem RABIT befinden sich folgende zerstörungsfreie Prüfsensoren: Ultraschallsensoren, elektrische Widerstandsmessungen, ein Impact-Echo-Sensor, ein Georadar und optische Kamerasysteme zur visuellen Aufnahme der Schäden auf dem Brückendeck. Alle 60 cm wird vom Inspektionsroboter ein Bild der Oberfläche erstellt. Die einzelnen Bilder werden nachträglich am Computer zu einem Panoramabild zusammengesetzt. Im Bericht zur Inspektion müssen zudem die Rissausbreitungsgeschwindigkeiten festgehalten werden, welche das System aus den Bilder bestimmt. Die aufgenommenen Daten werden per WLAN an einem Messcomputer in einem Fahrzeug übermittelt. Nebst der Analyse der anfallenden Datenmengen hat das Fahrzeug eine weitere Funktion, den Transport des Roboters von Einsatzort zu Einsatzort. 692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 3 (a) Vorderseite des Roboters RABIT mit den akustischen Sensoren und Kamera [14] und (b) Schematische Übersicht über die Sensoren am RABIT [14]

Seit seinen ersten Einsätzen im Jahr 2013 kam der Roboter zu über 100 dokumentierten Einsätzen auf Stahlbetonbrücken in Amerika. [14], [15]

3.3 Brückeninspektionsroboter mit Risserkennung

Die koreanische Universität Hanyang entwickelt seit 2008 ein Robotersystem, welches speziell für Untersichten von Brücken geeignet ist. Das System besteht aus den folgenden Komponenten einem Roboterarm (Abb. 4 (a)) montiert auf einem Lastwagen und einem zugehörigen leistungsfähigen Bildverarbeitungssystem (Abb. 4 (b)). Die Entwicklung folgt dem Bestreben einer regelmässigen Inspektion der Brücken gemäss dem koreanischen Recht und der Eindämmung der Instandhaltungs– und Instandsetzungskosten des Brückenbestandes. Der ausgearbeitete Algorithmus erkennt eigenständig Risse auf der Oberfläche der aufgenommenen Bilder und ist in der Lage dessen Breite und Länge automatisch zu detektieren. [16]



Abb. 4 (a) Rissaufnahme an der Untersicht einer Brückenplatte mittels eines optischen Sensors [16] und (b) Benützeroberfläche zur Steuerung des Roboters und für die Erkennung von Rissen [16]

Die Erkennung der Risse erfolgt in 4 Schritten. Nach der Aufnahme der Abbildung aus einer Videosequenz wird mit Filtern das Rauschen entfernt, gefolgt von der Entfernung der Artefakte. Mit morphologischen Operation bei der maschinellen Auswertung werden mögliche Risse bestimmt und dessen Länge und Breite bestimmt. Am Schluss werden sämtliche Bilder zu einem Panoramabild zusammengesetzt. Ungeachtet dessen besteht weiterhin die Möglichkeit, dass die Risse manuell einzuzeichnen. Eine Wiederholung der Rissmessung nach einem bestimmten Zeitintervall erlaubt den Vergleich der Risse und zeigt die Entwicklung der Risse im Brückenbauwerk auf. [16]

3.4 RoboSense

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes zwischen der Universität Kaiserslautern und den folgenden Partnern Portech, IT Innovation, ENEL und der Bundesanstalt für Materialwesen in Berlin wurde im Jahre 2000 ein Kletterroboter vorgestellt. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, einen Roboter zur Inspektion von Staudämmen und Brücken als Trägerplattform für zerstörungsfreie Prüfsensoren anzufertigen. Insbesondere nach Erdbeben soll der Roboter eine schnelle Inspektion von Staudämmen sicherstellen und mögliche Schäden detektieren. Die spezifischen Anforderungen an den Roboter waren die Reduktion der Kosten für die Inspizierung der Bauwerke, hohe Genauigkeit der Messdaten und die Reproduzierbarkeit der Daten. Schlussendlich sollte diese Entwicklung zur Erhöhung der Inspektionsraten an Staudämmen und Brücken führen.



Abb. 5 Erster Prototyp des Roboters RoboSense an einer Wand [17]

Der RoboSense kann sich an leicht gekrümmten Oberflächen mit kleinen Unebenheiten bewegen ohne Beeinträchtigung des gewünschten Fahrweges. Der Roboter hält sich mit einem Unterdruck an der Oberfläche fest und kann sich somit vertikal, horizontal als auch über Kopf dank zweier Antriebsräder in jede Richtung bewegen. [17]

3.5 Cromsci

Das Akronym Cromsci steht im Englischen für Development of a Climbing Robot with Negative Pressure Adhesion for Inspections. Dieser Roboter wurde für die zerstörungsfreie Inspektion von grossen Betonflächen an der Technischen Universität Kaiserslautern entwickelt. Die ersten Ansätze zur Entwicklung wurden im Jahre 2004 veröffentlicht [18]. Cromsci saugt sich mit einem Unterdruck auf der Betonoberfläche fest und wird von einem Operateur mit Sichtkontakt über 3 omnidirektionale Räder (Abb. 6 (a), (b)) gesteuert. Der runde Roboter hat einen Durchmesser von 80 cm, eine Höhe von 50 cm, bei einem Gewicht von rund 50 kg. Der Roboter verfügt über 7 Vakuumkammern für die Adhäsion, wovon allerdings nur 6 Adhäsionskräfte erzeugen müssen, um den Roboter am Bauwerk zu halten. Somit lassen sich kleine Unebenheiten auf der Bauwerksoberfläche überbrücken. Dieser Antrieb erlaubt eine Geschwindigkeit von bis zu 9.63 m/min auf der Betonoberfläche in vertikaler oder horizontaler Richtung. Zur Sicherheit ist der Roboter mit einem Seil gesichert, falls sich der Roboter an vertikalen Betonoberflächen oder sich über Kopf bewegt. Der Spitzenverbrauch beträgt über ca. 3'600 Watt, deshalb wird der Roboter extern über ein Kabel mit ausreichend Energie versorgt. Der Roboter ist als Trägerplattform gedacht für den Anschluss weiterer Sensoren wie Infrarot, Ultraschallsensoren, Laserscanner, Kameras für die Rissaufnahme oder die Messung der Betonüberdeckung. [19], [20]

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 6 (a) Schematische Darstellung des Cromsci und realisierte Ausführung [18]; und (b) Details über die Vakuumkammern des Inspektionsroboters [18]

Im Jahr 2012 wurde die Software und Sensorik des Cromsci soweit verbessert, dass sich der Roboter semi-autonom an Bauwerken bewegen kann. Bei der Entwicklung der Objekterkennung lag das Hauptaugenmerk bei von Hindernissen, welche zum Absturz des Roboters führen könnten. Das Risiko eines Absturzes soll verhindert werden, um erstens Menschen unterhalb des Bauwerks zu schützen und zweitens die Beschädigung des Roboters verhindern. Die Software lässt den Roboter eigenständig vor Hindernissen abbremsen und kann gegebenenfalls seine Fahrtrichtung anpassen, um auszuweichen. [21]

4 C2D2 Roboter – Entwicklung

4.1 Umwandlung des Paraswifts

Der entworfene Inspektionsroboter C2D2 (Climbing corrosion detecting device) ist eine Abwandlung des Paraswift Roboters (Abb. 7 (a), (b)). Der Paraswift wurde ursprünglich von Studierenden im Bachelor in Maschineningenieurwissenschaften in Kollaboration mit zwei Studierenden der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) als Fokusprojekt während des Frühlingssemsters 2010 an der ETH Zürich beim Institut Autonomous Systems Lab (ASL) entwickelt. Die Roboterentwicklung verfolgte zu jenem Zeitpunkt noch ein komplett anderes Ziel. Der Roboter sollte einem Unterhaltungszweck dienen, eine Wand hochzuklettern und danach einen Gleitschirm zu entfalten, abzuspringen und unbeschadet wieder auf dem Boden zu landen zur Freude der Zuschauer. Dieses Vorgehen ahmt einen Basejumper nach. Gemäss den gesteckten Zielen soll der Roboter von Höhen über 15 m abspringen und sicher landen können. Der Aufprall wird mit einem Schutzrahmen aus glasfaserverstärktem Material abgefedert (Abb. 7 (a)). Das ursprüngliche Projekt war grosszügig durch Disney gesponsert, welche den Roboter gerne mit einer Kamera ausrüsten wollten, um problemlos Räume aus allen Perspektiven zu filmen. [22], [23]



Abb. 7 (a) Finale Version des Roboters Paraswift mit Fallschirm [22] und (b) Paraswift mit der Designhülle [22]

Der Klettermechanismus des Paraswifts besteht aus einem neuartigen Vortexantrieb, dessen Impeller mit 6'000 bis 8'000 Umdrehungen pro Minute rotiert. Die Vortex-Technologie ist eine Art Saugmechanismus, die Saugleistung wird durch einen Propeller auf der Unterseite erzeugt, die benötigte Energie stammt aus einem Akkumulator. Der Vorteil dieser Technologie ist, dass keine vollkommene Abdichtung zwischen Roboter und der Wand bestehen muss, um die notwendigen Adhäsionskräfte zu erzeugen. Der Impeller wird von einem Brushless (Aussenläufer) mit zugehörigem Regler angetrieben, welcher häufig im Modellbau eingesetzt wird. Der Motor hat mit der vergleichsweise hohen Trägheit des grossen Impellers im Gegensatz zu kleinen Modellflugzeugpropellern zu kämpfen. Deshalb verfügt der verwendete Brushlessregler über einen Sanftanlauf, damit der Impeller überhaupt beschleunigt werden kann. Der Impeller ist aus einzelnen Aluminiumblechen gefertigt, welche durch Laserschneiden und Biegen bearbeitet wurden.

Für den Vortrieb an der Wand wurden zwei Antriebsräder und ein passives Stabilisierungsrad verwendet. Mit diesem Antrieb erreicht der Roboter eine Aufstiegsgeschwindigkeit von bis zum 25 cm/s an vertikalen Wänden. Der Vortexantrieb (Abb. 8 (a)) war zum Projektzeitpunkt noch kaum erforscht. Aus diesem Grund wurde in einem

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

ersten Projektierungsschritt der Antrieb nachfolgenden Kriterien, Effizienz und Gewicht mittels numerischer Simulationen optimiert. Der Roboter in der Lage sich auf unterschiedlichsten Oberflächenbeschaffenheiten fortzubewegen, wie beispielsweise gemauerte Wände aus Kalksandstein, auf Betonwänden oder Glaswänden. Die Konstruktion erlaubt es, Hindernisse auf Oberflächen bis zu einer Grösse von 5 mm zu überwinden, Fugen können bis zu einer Tiefe und Breite von 10 mm überwunden werden. Der Saugmechanismus erlaubt ein Fahren an Untersichten von Bauwerken, da genügend Adhäsionskräfte durch den Impeller aufgebaut werden.



Abb. 8 (a) Funktionsweise des Vortexantriebes [23] und (b) Grundplatte des Paraswifts aus einer Karbonsandwichplatte mit Aussparungen [23]

Der Vortex Antrieb ist in der Mitte einer 4.6 mm dicken Karbon-Sandwichplatte (vergleiche Abb. 8 (b)) an zwei Auflagerpunkten montiert. Die Auflagerpunkte müssen je Adhäsionskräfte von bis zu 40 N übertragen. Die Steifigkeit der Platte muss genügend gross sein, um die Durchbiegungen klein zu halten und eine gleichmässige Anpresskraft der Räder sicherzustellen. Bei zu grossen Durchbiegungen der Platte kann es zu Kontakt mit der Wand kommen oder zu Beschädigungen des Impellers oder beim grösserem Abfall der anziehenden Kräfte zu einem Absturz. An der Sandwichplatte wurden sämtliche anderen Bauteile (Elektronik, Schutzhülle, etc.) befestigt. Die Löcher in der Grundplatte 130 g leicht bei einer Länge von 45 cm und einer Breite von rund 30 cm. Das Gesamtgewicht des Paraswifts ohne die Designhülle beträgt 1.77 kg, mit der Designhülle 2.1 kg (Abb. 7 (a) und (b)).



Abb. 9 Übersicht über die wichtigsten Elektronik-Komponenten im Paraswift [22]

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Der Kern der Elektronik des Paraswifts ist der Mikrocontroller CoaX Board 3 von Skybotix (Abb. 9). Der Mikrocontroller (µC) verarbeitet die Sensor- und Eingabesignale und gibt die Informationen an die Servo – und Motorensteuerung weiter. Bei diesem Mikrocontroller waren schon ein Altimeter und ein Remotecontroller implementiert, dies ermöglichte eine kürzere Entwicklungszeit der Software. Die Software wurde mit einer State Maschine realisiert, somit wurden alle Zyklen in verschiedene Abschnitte wie Klettern, Fliegen usw. aufgeteilt. Die States können über die 4-Kanal Fernbedienung manuell vom Benützer gewechselt werden. Die unterschiedlichen Spannungen des Motors und der Servos werden per DC/DC Wandler zur Verfügung gestellt. Die Energieversorgung des Showroboters stellt ein Akkumulator mit einer Spannung von 11.1 V mit einer Kapazität von 3 Ah sicher. [24]

Der Paraswift lässt Raum für weitere Sensoren. Deshalb wurde parallel zu dessen Entwicklung im Rahmen einer Bachelorarbeit am ASL eine Kamera montiert. Diese Kamera nimmt in definierten Zeitabständen ein Foto der Umgebung auf und kann über zwei Servos um 2 Achsen gedreht werden. Die Kamera hat eine Auflösung von 640 x 480 Pixel, zusätzlich zur Bildinformation werden die Servopositionen vom CoaX Mikrocontroller ausgelesen und über Bluetooth übertragen. Am Schluss setzt ein externer Computer die Einzelbilder (teilweise über 200 Bilder) in einer halben Minute Rechenzeit zu einem Panoramabild (Abb. 10) zusammen. [25]



Abb. 10 Panoramabild mit Sicht über Zürich vom 10.06.2011 - 11:00, erstellt aus 267 Einzelbildern in 37.7 s [26]

4.2 Erster Prototyp des C2D2

Für den Einsatz als Inspektionsroboter an Stahlbetonbauwerken mussten einige Teile des bestehenden Roboters Paraswifts an den veränderten Einsatzzweck angepasst, entfernt oder hinzugefügt werden. Die Änderungen betreffen sowohl die Software als auch die Hardware. Die wichtigste Änderung für den Einsatz an Bauwerken bestand im Wechsel eines Rades zu einer eigens entwickelten Radelektrode. Diese Elektrode ist essenziell für die Detektion des Zustandes der Bewehrung und Voraussetzung für die Potentialfeldmessung. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Änderungen am Roboter bei der Umwandlung eines Showroboters zu einem Inspektionsroboter beschrieben.

In der aktuellen Konfiguration beträgt das Gewicht des Roboters rund 2'400 g und ist mit zwei Kameras und einer Methode zur Lokalisierung am Bauwerk bestückt. Der Beginn der Umwandlung vom Paraswift zu C2D2 war im September 2012. Die letzte Entwicklungsstufe des C2D2 mit dem akustischen Delaminationssensor ist in Abbildung 11 (a) dargestellt.

Die Abb. 12 zeigt einen schematischen Überblick über die wichtigsten Bauteile und die Funktionsweise des Roboters mit der Energieversorgung per Kabel, seinen Kommunikationsmöglichkeiten und der Potentialfeldmessung per Radelektrode. Im Vergleich zum Paraswift ist der Roboter mit neu einem Kabel verbunden, durch das Kabel wird der Roboter mit Wasser (Elektrolyt), Energie versorgt und dem Anschluss an die Bewehrung ist gewährleistet. Die Daten werden per WLAN instantan an einen Mess-computer in der Nähe übertragen.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 11 (a) Finale Version des C2D2 mit Delaminationssensor und (b) schematische 3D Darstellung des Roboters (ohne Delaminationssensor) mit dem Sichtfeld der beiden Kameras



Abb. 12 Überblick über den Aufbau und die schematische Funktionsweise des C2D2 mit den elektrischen Komponenten

4.2.1 Radelektrode

Die Radelektrode (Abb. 13 (a), (b)) wurde speziell für den C2D2 konstruiert und mit einem 3-D Druckverfahren angefertigt. Im Gegensatz zur Potentialfeldmessung mittels der Handelektrode wird die Radelektrode mit einer Feder auf die Betonoberfläche gedrückt. Die Radelektrode ist an der Grundplatte des C2D2 befestigt und befindet sich **692** | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

mittig im hinteren Teil des Roboters. Die Anpresskraft der Radelektrode wird durch die Feder möglichst konstant gehalten. Für den erforderlichen elektrolytischen Kontakt zwischen der Betonoberfläche und der Radelektrode wird die Betonoberfläche konstant mit Wasser benetzt. Die Wasserzufuhr erfolgt über einen dünnen Schlauch, welcher vom Boden aus mit einer peristatischen regelbaren Pumpe verbunden ist. Der Aussendurchmesser des PVC-Schlauches beträgt nur 3.2 mm, somit beträgt das Gewicht des mit Wasser gefüllten Schlauches bei einer Länge von 20 m nur 182 g. Die Regelung der Wasserzufuhr funktionierte bei den späteren Praxiseinsätzen äusserst zuverlässig und lieferte eine konstante Menge an Wasser für die Benetzung der Oberfläche. Für die Messung des Potentials wurde eine im Bauwesen übliche Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode als Referenz verwendet.

Gegenüber der konventionellen Messung mit der Referenzelektrode besteht bei der Messung mit der vorliegenden Radelektrode kein direkter Kontakt zwischen der Referenzelektrode und der Betonoberfläche. Der elektrolytische Kontakt wird über ein mit Wasser gefülltes Rohr sichergestellt. Die Radelektrode ist mit einem schwammähnlichen Material überzogen zur Sicherstellung des elektrolytischen Kontaktes. Diese Messanordnung erlaubt eine kontinuierliche Messung der Potentiale durch den Inspektionsroboter während der Fahrt.



Abb. 13 (a) erstes Schema der Radelektrode und (b) aktuellste Skizze der Radelektrode

4.2.2 Elektronik auf dem C2D2

Im Laufe der Entwicklung des C2D2 wurden nach und nach sämtliche elektronischen Bauteile durch leistungsfähigere Module oder Komponenten mit grösserem Funktionsumfang ersetzt (Abb. 12). Die Daten der Potentialfeldmessung können in Echtzeit vom Roboter über WLAN an einem Messcomputer übertragen werden. Auf der Grundplatte des Roboters befinden sich ein Mini-Computer (Gumstick) und ein Mikrocontroller (Robovero). Auf dem Mini-Computer ist das Betriebssystem «Robot Operating System» (ROS) installiert, welches zahlreiche Werkzeuge für die Steuerung des Roboters mitbringt. Wie zuvor beim Paraswift ist die Firmware in 4 unterschiedliche Zyklen (Statemachine) programmiert worden. Weitere Aufgaben des Mini-Computers sind die Sicherstellung der Kommunikation über WLAN oder die Kontrolle der Position (Lokalisierung). Hingegen der Mikrocontroller übernimmt untergeordnete Aufgaben, wie die Ansteuerung der Motoren (Vortex und Antriebsräder). Der C2D2 wird nach wie vor mit der Fernbedienung 2.4 GHz des Paraswifts gesteuert.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Während der weiteren Entwicklung wurden auf dem C2D2 in der pinken Kugel (Abb. 11 (a)) eine vorwärts- und eine rückwärtsgerichtete Kamera montiert (Abb. 14). Diese beiden Kameras sind auf die zu messende Oberfläche gerichtet. Die Kameras lösen mit 480 x 680 Pixel auf und zeichnen 24 Bildern pro Sekunde auf und zeichnen fortwährend die Oberfläche auf. Das Weiterverarbeiten des Videos wird in Kapitel 5.2.4 detaillierter beschrieben.



Abb. 14 (a) Frame aus der vorwärts gerichteten Kamera und (b) Frame aus der rückwärts gerichteten Kamera während einer Testfahrt an der ETH Zürich am Garagenkipptor aus Beton

4.2.3 Laufzeit und Vortexantrieb

Der Roboter Paraswift war batteriebetrieben und ausgelegt auf einen einzigen Absprung als Basejumper. Diese Zielsetzung beschränkte seine Laufzeit auf ca. 10 bis 15 min und war ausreichend für einen Absprung. Für den Einsatz als Inspektionsroboter auf Stahlbetonbauwerken reicht diese Einsatzzeit bei weitem nicht aus, geplant und gefordert sind Einsatzzeiten von 4 Stunden und mehr. Es wurde entschieden den Roboter mit einer stationären Anlage (Generator) über ein Kabel direkt mit Strom zu versorgen. Ein Verbindungskabel zur Bewehrung zur Bestimmung des Potentials muss ohnehin zwingend zum Roboter geführt werden. Der Aufwand zum Mitführen eines weiteren Kabels ist klein und schränkt den Roboter in seiner Beweglichkeit nicht zusätzlich ein. Der Verzicht auf einen Akkumulator reduziert das Gesamtgewicht des Roboters und erlaubt den Einbau eines leistungsfähigeren Motors für den Vortexantrieb oder das Hinzufügen von weiteren Sensoren. Die Adhäsionskräfte wurden gegenüber dem Paraswift auf bis zu 60 N gesteigert. Der Vortexantrieb hat einen Spitzenverbrauch von ca. 170 Watt.

4.2.4 Lokalisierung und Steuerung

Der Roboter wird von einem Operateur mit derselben Fernbedienung wie der Paraswift ferngesteuert. Für die Zuordnung der Potentialfeldmessung muss der Fahrweg auf dem Objekt bekannt sein. Zur Bestimmung des abgefahrenen Weges muss die aktuelle Position zum Messzeitpunkt bekannt sein, damit die Zuordnung der Messung zu einer Koordinate ermöglicht wird.

Für die Erkennung des Roboters am Bauwerk wurde am Roboter eine pinke Kugel befestigt. Die pinke Styroporkugel wurde aus zwei Gründen ausgewählt, erstens ist die Farbe pink nicht häufig bei Bauwerken oder im Hintergrund von Bauwerken anzutreffen. Zweitens sollte das Gewicht des Roboters nicht zu stark erhöht werden, daher wurde als Material Styropor mit einer geringen Dichte ausgewählt. Der Lokalisierungsalgorithmus führt 5 Schritte (Abb. 15) zur Bestimmung der Position. Der Roboter wird von einer PTZ-Kamera (Pan (schwenken), Tilt (neigen), Zoom (zoomen)) verfolgt, welche sich in der Nähe des zu untersuchenden Objektes mit freier Sicht befindet. Die verwendete Kamera (TrendNet TV-IP612P) hat eine Auflösung von 704 x 576 Pixel und zeichnet 24 Bilder pro Sekunde auf.



Abb. 15 Übersicht über die wichtigsten Schritte des implementierten Erkennungsalgorithmus

Im ersten Schritt des Erkennungsalgorithmus wird ein Bild im HSV-Farbraum aus einzelnen Frames der Überwachungskamera erstellt (Abb. 16). In HSV-Farbraum wird nach dem grössten Kreis gesucht. Danach wird mit dem RANSAC-Algorithmus [26] möglichst genau der Rand des grössten Kreises bestimmt und falsch zugeordnete Pixel innerhalb des erkannten Objektes und am Rand des Kreises herausgefiltert. Vom Kreis wird der Mittelpunkt und der Durchmesser bestimmt und gespeichert.



(a)

(b)

Abb. 16 (a) Frame aus der PTZ-Überwachungskamera und (b) selber Frame nach der Konvertierung in den HSV-Farbraum

In einem zweiten Schritt werden aus den drei geometrischen Grössen (Koordinaten) in ein lokales 3D-Koordinatensystem transformiert. Bei der Transformation spielen die Zoomstufe und die Grösse der Kugel resp. deren Radius (gemessen in Pixel) eine wichtige Rolle. Im dritten Schritt werden aus der Kamera die Werte für die Neigung und Drehung der Kamera ausgelesen und die Koordinaten ins globale Koordinatensystem des Kamerasystems umgerechnet. Diese Koordinaten werden sukzessive durch eine Ebene approximiert, bevor im letzten Schritt diese Ebene gedreht wird und die Punkte in ein 2-D Koordinatensystem übertragen werden. Schlussendlich ist noch ein Versatz zwischen der Position der Kugel und der Position der Radelektrode vorhanden. Der Versatz wird über eine Drehung des Koordinatensystems und eine Verschiebung ausgeglichen. Die Orientierung des Roboters kann über die Odometriedaten der Antriebsräder abgeschätzt werden und die Richtung der Fortbewegung ist bekannt durch die aufgezeichneten Positionsdaten. Die Genauigkeit der Odometriedaten nimmt beträchtlich ab, wenn ein Rad am Bauwerk durch eine Unregelmässigkeit auf der befahrenen Oberfläche blockiert wird. Der Fahrweg wird zwischen den einzelnen Frames linear interpoliert.

Die verschiedenen Fahrten des Roboters am selben Untersuchungsobjekt können zu einer einzigen Messfahrt zusammengefügt werden sofern die PTZ-Kamera nicht verschoben wird. Gegen Ende der der Weiterentwicklung des C2D2 wurde die Lokalisierung des Roboters verbessert dank eines lokalen Referenzsystems. Es wurden vier pinke

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Bälle mittels geraden Stücken zu einer Ecke zusammengefügt (Abb. 17 (a)) und diese Ecke bildet das Referenzsystem am Bauwerk. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass die Überwachungskamera von Zeit zu Zeit verschoben werden kann und die Messungen relativ verortbar bleiben und somit die Genauigkeit der Lokalisierung erhöht, da sich der Roboter tendenziell näher bei der Überwachungskamera befindet. Von jedem geplanten Kamerastandpunkt muss das Referenzsystem mit der Kamera sichtbar sein. Die Ebenen des Referenzkoordinatensystems müssen nicht mit der Ebene des Bauwerks zusammenfallen, auf welcher sich der Roboter am Bauwerk bewegt. Da die Lokalisierung erst gegen Ende des Projektes implementiert wurde, sind nur wenige Datensätze (Messfahrten) mit dem lokalen Referenzsystem vorhanden. Bei der Auswertung der Positionsdaten wird im Quellcode unterschieden, ob ein lokales Referenzsystem vorhanden ist oder nicht.



Abb. 17 (a) Koordinatensystemdarstellung mit vier pinken Bällen und (b) Idee des Referenzsystems als Ursprungsecke eines lokalen Koordinatensystems

Im Übrigen wurde die Lokalisierung durch die Orientierung des Roboters in der vertikalen Richtung dank Beschleunigungssensoren verbessert in der horizontalen Richtung mittels des Gyroskops und geraden Referenzlinien. Die Lokalisierungsgenauigkeit beträgt nach einer erfolgreichen Kalibrierung ca. ± 15 cm auf eine Distanz von ca. 20 m zur Überwachungskamera.

Für eine effiziente Aufnahme der Oberfläche muss der Operateur den Roboter in einer Schlangenlinie über den Bauwerksabschnitt bewegen. Je nach benötigter Auflösung soll die Oberfläche in einem breiteren oder schmaleren Netz abgefahren werden. Der Aufnahmebereich des Roboters ist limitiert durch seine geometrischen Abmessungen und der Platzierung der Radelektrode am hinteren Ende des Roboters (vergleiche Kapitel 5.2).



Abb. 18 Fahrweg des C2D2 an einer Wand mit Fernbedienung gesteuert mit dem linear interpolierten Fahrweg und mit markierten Messpunkten der Potentialfeldmessung

4.2.5 Messcomputer und GUI

Parallel zur Entwicklung des Roboters wurde am Messcomputer eine einfache grafische Benutzeroberfläche (GUI) implementiert. Die GUI basiert auf dem QT framework [27]. Die Benutzeroberfläche auf dem Bildschirm (Abb. 19) ist in zwei grosse Bereiche unterteilt. Die Werkzeuge auf der linken Hälfte kümmern sich um die Kommunikation und die Steuerung des Inspektionsroboters. Zum Beispiel wird auf dieser Seite die Kommunikation zwischen Messroboter und Messcomputer per WLAN initialisiert. Falls der Erkennungsalgorithmus den pinken Ball verliert, kann dieser wieder manuell per Pfeiltasten im GUI neu fokussiert werden. Auf der rechten Hälfte der Benutzeroberfläche kann einerseits der abgefahrene Pfad am zu untersuchenden Objekt dargestellt werden oder andererseits die gemessenen Potentialfeldwerte grafisch dargestellt werden.



Abb. 19 Bildschirmfoto des GUI auf dem Messcomputer während einer Messfahrt des C2D2

4.2.6 Delaminationssensor

Ein Ziel der Roboterplattform ist eine vollständige Analyse des Zustandes eines Stahlbetonbauwerks. Zu diesem Zweck soll der Roboter weitere nichtzerstörende Prüfsensoren oder Messinstrumente erhalten. Im Rahmen einer Bachelorarbeit am IfB der ETH Zürich im Frühlingssemester 2014 wurde ein Delaminationssensor (Abb. 20 (a), (b)) entwickelt. Dieser Sensor soll Abplatzungen aufgrund der Bewehrungskorrosion oder andere Hohlstellen wie Kiesnester detektieren können. Der 135 g schwere Delaminationssensor ist an der Grundplatte des Roboters befestigt und erlaubt die gleichzeitige Aufzeichnung von Potentialfeldmessdaten.

Der Roboter schlägt für die die Detektion einer Fehlstelle mit einem kleinen Hammer auf die Betonoberfläche und zeichnet das Echo mit einem Mikrofon aus. Das Mikrofon befindet sich im Zentrum des parabolischen Konzentrators (Abb. 20 (a)). Der Konzentrator schirmt das Mikrofon vom Lärm des Impellers des Vortexantriebes ab. Anhand dieser Daten kann entschieden werden, ob eine Delamination vorhanden ist oder nicht. Die Entscheidung, ob eine Delamination vorhanden ist oder nicht, übernimmt ein simpler, eigens ausgearbeiteter Algorithmus, welcher anhand des Frequenzpeaks entscheidet. Die Erkennung einer Fehlstelle mittels des Mikrofones ist nicht trivial, da der Roboter mit seinem Lärm das Signal erheblich stört trotz der Abschirmung durch den Konzentrator. Der Lärm des Roboters ist ziemlich konstant bei einer tieferen Frequenz von ca. 2 kHz und wird mit einem Tiefpassfilter möglichst herausgefiltert. Die weiteren Schritte des Algorithmus sind im Flowchart in Abb. 21 dargestellt.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 20 (a) Delaminationssensor an der Grundplatt des C2D2 mit dem Schlaghammer und Mikrofon im parabolischen Konzentrator [29] und (b) Aufbau des Schlaghammers aus der Sicht von unten [29]



Abb. 21 Vereinfachtes Flow-Chart der Signalverarbeitung für die Erkennung einer Delamination nach [28]

Die Funktionstüchtigkeit dieses Sensors wurde an einer eigens erstellten Betonwand überprüft, welche vor dem Betonieren mit unterschiedlichen Delaminationsstellen präpariert wurde. Die Delaminationsstellen in der Betonwand unterscheiden sich bezüglich geometrischer Ausdehnung und der Distanz zur Oberfläche. Die Betonwand ist beidseitig zugänglich für die Aufnahme von Messdaten mit dem Inspektionsroboter, sie kann ebenfalls flach auf den Boden gelegt werden. Die Abmessungen der Betonwand betragen 2 x 1.5 m, bei einer Dicke von 0.25 m mit einer vierlagigen Bewehrung mit Durchmesser 10 mm und Qualität B500B. Die künstlichen Fehlstellen (1, 2, 3, 5, 6, 8, 10) in Abb. 22 bestehen aus einer zweilagigen Plastikfolie gefüllt mit Luft und haben jeweils eine unterschiedliche Ausdehnung. Diese Hohlstellen sind an unterschiedlichen Tiefen in der Betonwand verteilt. Die beiden zylindrischen Objekte (7,9) in Abb. 22 sind Plastik-schäume und simulieren Poren in unterschiedlichen Grössen. Das Objekt mit der Nummer 4 besteht aus zwei Plastikfolien mit einem sehr kleinen Abstand zueinander und repräsentiert einen sehr kleinen Defekt innerhalb der Betonwand.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 22 Plan der Defekte in der Betonwand, horizontale Projektion und Seitenansicht [28]

Der finale Test des Sensors an der Wand in einem Raster von 100 x 100 mm ergab insgesamt 266 einzelne Messpunkte. Während der Messung lag die Platte flach auf dem Boden. Die Frequenzmaxima sind in Abb. 23 dargestellt und farblich nach der Höhe des Wertes unterlegt. Falls kein dominantes Frequenzmaximum vorhanden war, ist die entsprechende Zelle mit einem x gefüllt. In der Abbildung sind die künstliche Defekte markiert, wobei die schwarzen rechteckigen Boxen oberflächennahe Delaminationen markieren und die roten Boxen tieferliegende Delamination in der gemessenen Konfiguration. Die schwarzen Kreise deuten die Hohlstellen innerhalb der Betonwand an. Die oberflächennahen, grossen Delaminierungen (Objekte 1, 5, 10) wurden vom Algorithmus aufgrund der tiefen Frequenz von ca. 3 kHz zweifelsfrei erkannt. Sogar die kleineren Fehlstellen (Objekte 3, 4) wurden entdeckt. Allerdings wurde der Defekt mit der Nummer 4 nicht an der wirklichen Position detektiert. Bei tieferliegenden Delaminationen wurde eine Frequenz von ca. 9.6 kHz erwartet bei einer Betonüberdeckung von 210 mm. Eine solch hohe Frequenz wurde auf der Betonwand an keiner Stelle gemessen. Einige vergleichsweise tiefe Frequenzen wurden an Stellen gemessen, wo diese nicht zu erwarten waren. Demzufolge wird angenommen, dass diese Messungen Reflexionen des Einschlags an den Delaminationen sein könnten. Es scheint so, also dass die Kiesnester auf der Unterseite der Betonplatte an den Koordinatenpaaren [160/140], [170/130], [170/140] in Abb. 23 leicht höhere Frequenzen verursachen.

D	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	А
10	7421	8007	7324	8593	6835	8789	8203	8398	8007	7812	7226	7226	6835	7421	6800	7617	7421	7031	7226	
20	7031	8350	7617	8007	x	7031	6	7031	8593	6835	7421	7617	7421	8398	8789	7812	7226	7031	7421	
30	8203	8007	3515	3:25	7617	6054	7421	8007	8593	78 12	7812	8203	7031	3 82 03	31 25	7031	7421	8593	8398	
40	8203	8398	3906	1 7031	0 6835	6835	8007	8593	8789	7031	2929	7031	8398	7421	8203	7421	7421	7031	7031	
50	8398	8593	8398	7031	7421	7031	8593	8789	8203	8598	4882	7226	8398	7081	3906	6835	7031	8189	8007	
60	6250	2929	2929	8593	8593	7421	8789	8203	8203	7031	7617	4 8789	6835	8203	2539	2734	2929	893	8593	
70	6640	3320	3320	2987	6250	8789	6825	8203	x	7226	8007	7226	8203	6885	2929	2539	3125	7617	8593	
80	6054	2978	3125	7812	9 8593	8593	3320	/ 6835	6640	8593	7031	8398	x	8203	2734	2734	2539	7617	7421	
90	8154	7226	8007	8398	7812	8398	3125	3320	6054	8593	7617	7421	7226	8398	3125	2734	2929	8189	8398	
100	7031	8398	6835	6250	3320	8593	7421	3320	3125	3320	8789	8007	6835	7081	2929	3320	2735	7031	7031	
110	8203	8789	8203	8593	6835	7031	6054	3125	2539	7812	8203	8398	8007	6835	7800	6835	x	8007	x	
120	7226	7617	8789	7421	7031	8203	7421	3125	3929	7612	6835	8007	8203	8203	8203	8593	7812	6835	7421	
130	7421	<mark>8</mark> 7226	8007	6250	7031	x	5 68 55	8007	7220	3520	7617	8007	8789	8007	3320	6835	8789	8593	6640	
140	8593	x	7617	7226	6054	x	7726	7617	x	7617	8203	7031	8007	8007	7031	8593	8398	7226	7226	
с																				В

Abb. 23 Resultat der finalen Delaminationsmessungen an der präparierten Wand mit einem Messraster von 100 x 100 mm, schwarze Boxen markieren eine oberflächennahe Delamination, rote Boxen tieferliegende Delaminationen und schwarze Kreise markieren Hohlstellen in der Wand (Abb. 22) [28]

Der Delaminationssensor erkennt oberflächennahe Hohlstellen zuverlässig, die tieferliegenden Fehlstellen kann er nicht zweifelsfrei detektieren. Jedoch wird angenommen, dass eine Verfeinerung des Messrasters zu einer signifikanten Verbesserung führen würde. Zhu und Popovics [29] schlagen vor, dass das Messraster die halbe Grösse des kleinsten detektierbaren Defektes sein sollte. Im Falle der vorliegenden Mauer ist der kleinste Defekt ca. 50 x 50 mm und somit das empfohlene Messraster kleiner als 25×25 mm. Ein solches Raster führt zu über 4'000 einzelnen Messungen an der vorliegenden Wand und wäre mit einfachen Handmessungen kaum mehr zu realisieren und viel zu teuer.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit konnte der Inspektionsroboter mit einem neuen zerstörungsfreien Sensor ergänzt werden ohne die anderen Funktionen des bestehenden Systems zu beeinträchtigen. Der Sensor in Kombination mit der Software erkennt oberflächennahe Fehlstellen im Beton zuverlässig. [28]

4.3 Patentantrag für die Radelektrode

Für den Roboter konnte im Jahr 2013 erfolgreich ein Patentantrag für die entwickelte Radelektrode (Abb. 24 oder Abb. 13 (a), (b)) eingereicht werden. Im Antrag werden insgesamt 13 Patentansprüche geltend gemacht. Die englischsprachige Patentschrift trägt den Titel «Climbing robot for corrosion monitoring and sensor for potential mapping». Der Patentantrag wurde von den Behörden geprüft und akzeptiert. Aus finanziellen Gründen wurde auf die definitive Patentierung verzichtet, demnach ist die Radelektrode heute patentrechtlich nicht geschützt. [30]



Abb. 24 Skizze der Radelektrode in der Patentanmeldung [30]
5 Anwendung auf Bauwerken

Die Betriebstauglichkeit des Inspektionsroboters C2D2 wurde in der Praxis an verschiedenen Infrastrukturbauten aus Stahlbeton erprobt. Das Ziel dieser Anwendungen ist es, Erfahrungen im Umgang mit dem Roboter zu sammeln und dessen Möglichkeiten und Grenzen ausführlich zu evaluieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen der Verbesserung des Roboters dienen. Erfahrungen sollen unter anderem in folgenden Bereichen gesammelt werden:

- Aufsetzen des Roboters an Wänden, Untersichten
- Sicherung des Roboters gegen Herunterfallen
- Positionierung der Kamera zur Lokalisierung
- Umgang mit Hindernissen an Objekten (Kanten, Aussinterungen und dgl.)

Für die Weiterentwicklung des C2D2 wurde an der ETH ein spezielles Garagenkipptor aus Leichtbeton im Rahmen einer Bachelorarbeit am IfB erstellt. Um die entwickelte Radelektrode des C2D2 ausgiebig testen zu können wurden an bekannten Stellen korrodierte Eisen und sonstige Fehlstellen vorgängig eingeplant. Das Garagentor kann in 4 unterschiedlichen Neigungsstufen arretiert werden, neben horizontal und vertikal ebenfalls in zwei Zwischenstufen. Vertikale Flächen sind an Bauwerken häufig zu finden (Stützwände, Widerlagerwände, Flügelmauern etc.), selbiges gilt für horizontale Flächen wie Unterführungen, Untersichten von Brückenplatten oder Galerien. [31]

5.1 Testflächen

5.1.1 Garagenkipptor

Das Garagentor (Abb. 25) hat eine Länge von 2.85 m bei einer Breite von 1.80 m und eine Dicke von 6.0 cm und wurde aus Leichtbeton gefertigt. Die Bewehrung besteht aus einem Netz mit Durchmesser 6.0 mm. Das Bewehrungsnetz ist exzentrisch platziert, somit betragen die Überdeckungen 20 mm und 34 mm. Auf der Garagenplatte sind mehrere vorkorrodierte Stellen vorhanden, welche vom restlichen Armierungsnetz nach Bedarf elektrisch isoliert werden können. Die Korrosion dieser Bewehrungseisen wurde durch das Einbetonieren in chloridkontaminierten Mörtel erreicht. Auf dem Garagentor sind ebenfalls zwei vorkarbonatisierte Flächen vorhanden. Der Beton wurde durch die intensive Begasung mit Kohlenstoffdioxid karbonatisiert. Zusätzlich sind im Garagentor zwei perforierte Kunststoffschläuche eingelegt um den Beton lokal befeuchten zu können. Die Lösungen können nach Bedarf zusätzlich Chloride enthalten. In der unteren linken Ecke des Garagentors (Abb. 25 (a)) wurde zusätzlich ein Titannetz eingelegt, welches als Anode für Versuche mit kathodischem Korrosionsschutz verwendet werden kann. [31]

Das erstellte armierte Betongaragentor wurde im weiteren Verlauf des Projektes für die Entwicklung und Prüfung der Lokalisation des Roboters, sowie die Überprüfung der Odometriedaten verwendet.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 25 (a) Skizze des Garagentors mit Karbonatisierungsstellen nach [31] und Korrosionsstellen und (b) Foto des Garagentors im Keller der ETH

Im Rahmen eines Praktikums für Studierenden der Bauingenieurwissenschaften an der ETH Zürich werden während des Herbstsemesters 2014 nahezu wöchentlich Potentialfeldmessungen am Garagentor erhoben. Insgesamt wurden während insgesamt 11 Wochen Potentialfeldmessungen durchgeführt in einem Messraster von 150 × 150 mm, wobei vor jeder Messung das Garagentor genässt worden ist für einen ausreichenden elektrolytischen Kontakt. Die Potentialfelddaten der unabhängigen Messungen der Studierenden und des Roboters sind in Abbildung 26 (a) und (b) dargestellt. Die Gegenüberstellung der Messung zeigt deutliche absolute Unterschiede im Potential. Die Auswertung der Robotermessung zeigt, dass in der vertikalen Richtung die Messdaten grösser sind als die Abmessungen der Wand. In der horizontalen Richtung sind die Abmessungen kürzer als die exakten Masse des Kipptors. Die deutlich negativeren Potentiale in Abb. 26b sind auf stärkere Befeuchtung zurückzuführen.



Abb. 26 (a) Potentialfeldmessung mit C2D2 auf dem Garagentor vom 24.04.2014 in einem Messraster von 150 × 150 mm und (b) Potentialfeldmessung der Studierenden im Bachelor des Garagentors im Frühlingssemester 2017

Die Histogramme der Messdaten des Roboters und einer Gruppe Studierender sind in Abb. 27 (a) und (b) dargestellt. Beide Histogramme weisen eine deutliche Spitze auf. Es sind bei beiden Messungen im Vergleich zur jeweiligen Spitze mehr Messwerte bei niedrigeren Potentialen vorhanden als bei höheren Potentialen.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 27 (a) Histogramm der Messdaten des Roboters (Abb. 26 (a)) und (b) Histogramm der Messdaten der Studierenden im Praktikum (Abb. 26 (b))

Eine Überlagerung der Potentialfeldmessdaten mit dem entzerrten Bild der Kamera ist in Abb. 28 ersichtlich. Die Abbildung des Garagentors besteht aus nachträglich erstellten Fotografien. Die einzelnen Bilder wurden am Computer zu einem Panoramabild zusammengefügt und entlang der rechtwinkligen Kanten des Garagentors entzerrt. Schlussendlich wurde das Panoramabild (vergleiche Abb. 67 und Kapitel 5.2.4) mit dem Potentialfeld (Abb. 26 (a)) überlagert und in Abb. 28 gezeigt. Auf der Oberfläche sind trotz der Korrosion der Bewehrung keine Rostspuren zu entdecken. Hingegen sind viele Risse sichtbar, die Ursache für die Risse ist das Schwinden der verwendeten Leichtbetonmischung.



Abb. 28 Überlagerung der Potentialfeldmessdaten mit dem einem entzerrten Bild der Garagenobertorfläche (vergleiche Abb. 28 und Abb. 67)

5.1.2 Widerlagerwände in Luterbach

Die Widerlagewände sind Teil der Autobahnunterführung der N5 an der Teilstrecke zwischen Zuchwil - Luterbach. Das Bauwerk wurde im Jahr 1968 erstellt und ist Bestandteil des 1971 eröffneten Autobahnabschnittes. Es handelt sich beim Objekt um einen aus der Brückenplatte und Widerlagerwänden bestehenden Rahmen mit ca. 10 m Spannweite. Die unterführende Strasse hat unter der Brücke ihren Tiefstpunkt, dementsprechend fliesst das Wasser von beiden Richtungen der Unterführung zu und wird hier abgeleitet. Im Winter sorgt jede Schneeschmelze für reichliche Zufuhr von Tausalzen. Während einer Voruntersuchung 1988 wurden auf der gegenüberliegenden Seite der Unterführung alarmierend hohe Chloridgehalte festgestellt. Nach zahlreichen Abklärungen konnte an diesem Objekt die elektrochemische Chloridentfernung (ECE) erprobt werden, um in der Praxis Erfahrungen zu sammeln. Am 30. August 1989 wurde das Bauwerk erstmals einer Potentialfeldmessung unterzogen um eine geeignete Fläche für die Entsalzung zu eruieren. [32]

Die Potentialfeldmessdaten wurden in einem Raster von 150 × 150 mm aufgenommen. Die Messungen wurden ab dem Fundament bis auf eine Höhe von 2.4 m durchgeführt (ca. 1.6 m ab Terrain) durch die IBWK Radelektrode und der zugehörigen IBWK Software ausgewertet. Das mit dem computerunterstützten 8-Rad-Elektrodensystem Potentialfeld zeigte bis in eine Höhe von ca. 45 cm ab Belag starke, örtliche Korrosion, oberhalb von ca. 1.2 m intakte, passive Bewehrung. In Fahrtrichtung des Verkehrs wurden generell negativere Potentiale gemessen, verursacht durch Spritzwasser- und Sprühnebelbeaufschlagung der Oberfläche.

Nach der Auswertung der Potentialfeldmessdaten wurde eine Fläche von ca. 60 m² der elektrochemischen Chloridentfernung unterzogen. Bei der elektrochemischen Chloridentfernung wird zwischen dem Bewehrungsstahl im Beton und einer temporär installierten Anode auf der Betonoberfläche ein elektrisches Feld erzeugt, welches die Chloridionen an die Anode überführt und auf diese Weise aus dem Beton entfernt. Eine Kontrollmessung zur Überprüfung der Wirksamkeit der Chloridentfernung wurde am 25. April 1990 durchgeführt. Die Teilflächen A und B (Abb. 29) zeigten trotz positiven Potentialen (Repassivierung der Bewehrung) noch zu hohe Chloridgehalte auf Bewehrungsniveau. Dort wurde eine zweite Chloridentfernung durchgeführt. Die abschliessende Potentialfeldmessung wurde 1991 durchgeführt. Die Abbildung 29 zeigt die Resultate der 3 durchgeführten Potentialfeldmessungen an der Widerlagerwand in Luterbach.



Abb. 29 Resultate der Potentialfeldmessung an der Unterführung in Luterbach in einem Raster von 150 × 150 mm: (a) Ausgangszustand, (b) Nach der ersten Entsalzung und (c) nach der zweiten Entsalzung [32].

Das Potentialfeld nach der ersten Entsalzung (Abb. 30), aufgenommen einige Monate nach Abschalten des Stroms, um die Messung nicht zu verfälschen, zeigt eine deutliche Verschiebung der Potentiale zu positiveren Werten. Die markanten Bereiche mit negativeren Potentiale entlang der Terrainhöhe (Abb. 29 (b)) sind grösstenteils zu positiveren Werten verschoben worden. Einzig in der Feldmitte sowie auf der Seite von Luterbach sind noch grössere Bereich mit deutlich negativeren Potentialen vorhanden, welche höchst wahrscheinlich noch aktiv korrodieren. Die untersten Bereiche in der Potentialfeldmessung mit den stark negativen Werten sind mit ziemlicher Sicherheit auf eine Durchfeuchtung der Betonfläche zurückzuführen. Aus der Summenhäufigkeitskurve (Abb. 30) lässt sich eine mittlere Potentialverschiebung um ca. + 50 mV entnehmen zwischen den Zeitpunkten vor nach der elektrochemischen Chloridentfernung. [32]



Abb. 30 Summenhäufigkeitsverteilung der gemessenen Potentialwerte vor, nach der ersten und nach der zweiten elektrochemischen Chloridentfernung (ECE). Die Messungen erfolgten jeweils ca. 6 Monate nach der Entsalzung (Abb. 29) [32]

Der Zustand nach der zweiten Entsalzung an den beiden Teilflächen (A, B) in Abb. 29 (c) zeigt eine mittlere Verschiebung um ca. 100 mV CSE hinzu positiveren Werten im Vergleich zum Ausgangszustand. Der Chloridgehalt hat sich wie nach der ersten Entsalzung in den Teilflächen A & B (vergleiche Abb. 29) um weitere 40 % gesenkt. Das primäre Ziel des Verfahrens war der Entzug von Chloridionen aus dem Beton um die Bewehrung vor weiterer chloridinduzierter Korrosion zu schützen und eine weitere Reduktion des Bewehrungsquerschnittes zu unterbinden. Durch das Anlegen einer Spannung entsteht auf der Oberfläche der Bewehrung Hydroxyionen was zu einer Erhöhung des pH-Wertes an der Bewehrung führt, so ist die Repassivierung der Bewehrungseisen erleichtert.

Die flächendeckende Information des Potentialfeldes zeigt die Wirksamkeit der elektrochemischen Chloridentfernung, verdeutlicht durch die Verschiebung der Potentialfeldmesswerte zu positiveren Werten was eine Repassivierung des Bewehrungsstahls anzeigt. Die Widerlagerwand wurde bis in eine Höhe von etwa 1.5 m mit einem kunststoffmodifizierten Mörtel beschichtet, um ein weiteres Eindringen der Chloride zu verhindern und die Lebensdauer des Bauwerks zu erhöhen.

Die Widerlagerwand wurde vom Korrosionsroboter ausführlich an verschiedenen Daten abgefahren. Eine erste Probemessung fand am 04.02.2014 statt. Abbildung 31 (a) zeigt den Roboter im Einsatz und die Abb. 31 (b) zeigt das aufgenommene Potentialfeld dieser Probemessung mit einem Messraster von 150 × 150 mm.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 31 (a) C2D2 an der Widerlagerwand in Luterbach im Einsatz und (b) Resultat eines Probelaufs an der Widerlagerwand vom 04.02.2014 in Luterbach mit einem Messraster von $150 \times 150 \text{ mm}$

Eine grossflächige Messung des Inspektionsroboters an der Widerlagerwand fand am 10.04.2014 statt. Es wurden durch den Roboter total 29'891 einzelne Messpunkte bestehend aus Positionskoordinaten und zugehörigem Potentialmesswert aufgezeichnet. Die abgefahrene Fläche betrug ungefähr 64 m². Einen fehlerhaften Potentialwert wiesen (11.7 %) auf, 3'489 Messpunkte eine unmögliche Position wiesen 9'384 Koordinatenpaare (32.9 %) auf. Schlussendlich reduziert sich der Datensatz auf 18'153 Messpunkte auf 60.7 % der ursprünglichen Datenpunkte. Im Gegensatz zu einer Messung von Hand, bei welcher sich auf derselben Fläche mit einem Messraster von 250 × 250 mm ca. 1'100 Punkte befinden würden, hat der Roboter trotz zahlreicher Ungenauigkeiten signifikant mehr Daten aufgezeichnet. Dies erlaubt eine Mittelwertbildung an einzelnen Messrasterpunkten. Die Abbildung 32 stellt die Messdaten visuell dar und zeigt auf, dass in einigen Bereichen keine Messdaten durch den Roboter aufgezeichnet worden sind.

Eine Verfeinerung des Messrasters von 250×250 mm auf 150×150 mm ist in Abb. 33 dargestellt. Die Anzahl der Pixel mit mindestens einem Messwert nimmt deutlich ab und auf der Fläche bilden sich kleine Teilflächen ohne Messwert. Das Messraster kann bei der Auswertung am Computer nach Belieben angepasst werden und erlaubt einen Vergleich mit von Hand aufgezeichneten Messungen in einem beliebigen Messraster. Für die weiteren Schritte wird ein Messraster von 200×200 mm angewandt.



Abb. 32 Messung an der Widerlagerwand in Luterbach mit dem C2D2 am 10.04.2014 mit einem Messraster von 250 × 250 mm aufgenommen durch den Inspektionsroboter



Abb. 33 Messung an der Widerlagerwand in Luterbach mit dem C2D2 am 10.04.2014 mit einem Messraster von 150 × 150 mm aufgenommen durch den Inspektionsroboter



Abb. 34 Messdichte mit einem Messraster von 200 x 200 mm an der Widerlagerwand in Luterbach aufgenommen durch den Inspektionsroboter



Abb. 35 Standardabweichung pro Messpunkt der Potentialmessdaten an der Widerlagerwand in Luterbach aufgenommen durch den Inspektionsroboter (Messraster von 200 x 200 mm)

Die vorhin beschriebene Zuordnung der aufgenommenen Messpunkte auf ein gewähltes Messraster erlaubt eine einfache statistische Analyse an jedem Pixel. Die Analyse zeigt einerseits, wie viele Messpunkte dem jeweiligen Pixel zugeordnet wurden (Abb. 34) und wie stark die Streuung am jeweiligen Messpunkt ist (Abb. 35). Die mittlere Anzahl an Messpunkten pro Pixel beträgt 11.2 bei einem Messraster von 200 x 200 mm. In der Abbildung 35 werden alle Standardabweichungen über 50 mV der Farbe schwarz zugeordnet. Das Resultat der statistischen Auswertung zeigt, dass für die vorliegende Messung die Standardabweichung in 90 % der Fälle kleiner als 22 mV ist.

Die Grafik in Abb. 36 zeigt das Histogramm der Messungen des Inspektionsroboters an der Widerlagerwand in Luterbach bei einem Messraster 250 × 250 mm aus Abb. 32. Das Diagramm zeigt zwei Spitzen, welche sich in einem Abstand von ca. 50 mV befinden und besteht aus 610 Messpunkten.



Abb. 36 Histogramm der Messungen von C2D2 an der Widerlagerwand in Luterbach vom 10.04.2014 mit einem Raster von 250 × 250 mm (Abb. 32)



Abb. 37 Summenhäufigkeitsverteilung der Potentialfeldmessdaten der Messung mit dem Roboter vom 10.04.2014 an der Widerlagerwand in Luterbach mit einem Raster von 250 × 250 mm (Abb. 32 und vergleiche mit Abb. 30)

Zum Vergleich der Messungen mit der Abb. 30 wurde das Histogramm in Abb. 36 in das Summenhäufigkeitsdiagramm umgewandelt und ist in Abb. 37 dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die gemessenen Potentiale sich nochmals leicht zu positiveren Werten verschoben haben und somit sich die Mauer zum Messzeitpunkt in einem guten Zustand befindet.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Während der Fahrten vom 10.04.2014 an der Widerlagerwand in Luterbach wurden die Videoaufnahmen aller drei Kameras gespeichert. Die Abb. 38 zeigt einen Ausschnitt aus der PTZ-Kamera und den beiden Kameras auf dem Inspektionsroboter zum selben Zeitpunkt. Der Ausschnitt (b) zeigt den Übergang von der Wand zur Decke. Im Ausschnitt (c) erkennt man die Spur, der mit wasserversorgten Radelektrode sowie das Verbindungskabel des Inspektionsroboters.



Abb. 38 Aufnahmen zum selben Zeitpunkt während einer Messfahrt (a) Externe PTZ Kamera, (b) Einzelbild der Frontkamera auf dem Inspektionsroboter und (c) Einzelbild der rückwärtsgerichteten Kamera auf dem C2D2



Abb. 39 (a) Skizze eines Ausschnittes der Widerlagerwand in Luterbach, (b) Potentialfeld des Inspektionsroboters beim Aufwärtsfahren und (c) Einzelbild aus dem Video des C2D2 entzerrt entlang des Kabels deckungsglich mit dem Potentialfeld in (b)

Die Abb. 39 stellt eine Übersicht über einen möglichen Prozess der Nachbearbeitung der anfallenden Datenmengen dar. In der Teilabbildung (a) ist eine Skizze der Messung vorhanden mit Start- und Endzeitpunkt der dargestellten Messungen. Der Roboter ist ca. 1.5 m über dem Boden zur Messfahrt gestartet. Da die Messelektrode sich am Ende des Roboters befindet können nicht alle Bereiche der Wand erreicht werden. Je nach Orientierung des Roboters an der Wand (horizontal oder vertikal) ergeben sich leicht unterschiedliche Mindestabstände. Der Mindestabstand ist durch die rot markierte Fläche angedeutet. In der Teilabbildung (b) ist das Potentialfeld grafisch dargestellt und in der Teilabbildung (c) ist ein Frame des Videos der rückwärtsgerichteten Kamera gezeigt. Der Zeitpunkt der Aufnahme ist so gewählt, dass sich der Inspektionsroboter zu diesem Zeitpunkt am höchsten Punkt an der Wand befindet. Es muss die unterschiedliche Orientierung zwischen den Teilabbildungen (b) und (c) beachtet werden. Der Nullpunkt der Ordinatenachse befindet sich in diesem Fall bim zuletzt erreichten Punkt. Die Gegenüberstellung der Potentialfeldmessdaten und dem visuellen Eindruck münden im Ergebnis, dass sich auf der Oberfläche keine sichtbaren Unterschiede beim Sprung des Potentials erkennbar sind.

5.1.3 Untersicht einer Brückenplatte an der Gotthardpassstrasse

An einer Brücke an der Gotthardpassstrasse wurden mehrere Potentialfeldmessungen mit dem Roboter durchgeführt. Während der Untersuchung wurde eine Fläche mit einer Breite von ca. 8 m und einer Länge von ca. 20 m abgefahren. Das Resultat der Potential-feldmessung ist in Abb. 40 farblich dargestellt (Messraster von 250 x 250 mm), aufgrund der Potentialmessdaten ist an dieser Brückenuntersicht keine Korrosion vorhanden. In der Darstellung des Potentialfelds sind insgesamt 2'822 Pixel vorhanden, welche den Mittelwert des Potentials am jeweiligen Rasterpunkt darstellen. Die Grafik ist zusammengesetzt aus 5 am gleichen Tag erfolgten Teilmessungen und enthält über 13'000 Einzelmessungen der Brückenuntersicht.



Abb. 40 Potentialfeldmessung unter einer Brückenplatte an der Gotthardpasstrasse mit einem Raster von 250 × 250 mm aufgenommen durch den Inspektionsroboter



Abb. 41 Histogramm der Potentialfeldmessdaten unterhalb der Brückenplatte an der Gotthardpassstrasse (Abb. 40)

Die Abb. 41 zeigt die schmale Potentialfeldmessverteilung der Messdaten im Histogramm mit einer ausgeprägten Spitze bei ca. 75 mV CSE. Der Unterschied zwischen dem grössten und kleinsten Wert auf der gemessenen Fläche sind 57 mV CSE. Nahezu sämtliche Messungen befinden sich zwischen -50 mV CSE und 150 mV CSE.

5.1.4 Tunnelwände an Portalen der Gotthardpassstrasse

Für die Messungen vom 10./11. Juni 2014 an der Gotthardpassstrasse N02 wurde der Roboter in einem Tunnel und später in einer Galerie in der näheren Umgebung erprobt. Der Tunnel Costoni di Fieud hat eine Länge von 796 m und befindet sich zwischen Chiasso und dem Gotthardpass. Der Strassentunnel wurde 1966 in Betrieb genommen und besteht aus einer gewölbten Röhre mit einem Innenradius von 4.85 m. Der vermasste Tunnelquerschnitt ist in Abb. 42 (a) dargestellt und die Teilabbildung (b) zeigt einen Ausschnitt der Frontkamera auf dem Inspektionsroboter.



Abb. 42 (a) Vermasster Tunnelquerschnitt und (b) Einzelbild der Frontkamera im Tunnel Costoni di Fieud



Abb. 43 Innenseite der Tunnelwand im Costoni di Fieud an der Gotthardpassstrasse

Der Lokalisierungsalgorithmus des Inspektionsroboters ist nicht ausgelegt für gekrümmte Flächen, daher gab es Probleme im vierten und im fünften Schritt der Lokalisierung des Roboters am Bauwerk (vergleiche Kapitel 4.2.4), da die Punkte auf eine angenommene Ebene projiziert werden. Somit ist die Projektion der Koordinaten deutlich ungenauer. Die Krümmung stellt zusätzlich eine Herausforderung für die Adhäsion des Vortexantriebes dar. So musste der Abstand zwischen den Impeller und der Oberfläche der gekrümmten Tunnelwand erhöht werden damit der Roboter sich überhaupt an der Wand bewegen kann ohne mit einer Ecke seiner Bodenplatte an der Oberfläche zu kratzen oder mit dem Impeller die Betonoberfläche zu streifen. Eine vorgängige Messung zeigte, dass dadurch die Adhäsionskräfte auf ca. 52 N zurückgegangen sind. Sie sind jedoch noch ausreichend um die Messungen gefahrlos durchzuführen.

Der Inspektionsroboter hatte grosse Schwierigkeiten mit der rauen Tunneloberfläche. Die mangelhafte Traktion, teilweise verursacht durch die geringeren Adhäsionskräfte des Vortexantriebes, machte Messungen innerhalb des Tunnelquerschnittes nahezu unmöglich. Ein weiterer Faktor für die mangelhafte Traktion war die schmutzige Tunnelinnenwand. Abb. 43 zeigt einen Bereich innerhalb des Tunnelquerschnittes, den der Roboter nicht befahren konnte. Die Erhebung auf der Oberfläche war zu gross und hätte womöglich zu einem Absturz des Roboters geführt. Insgesamt wurden im Tunnel 10 Messfahrten vom Inspektionsroboter an 3 verschiedenen Bereichen durchgeführt und insgesamt wurden. 21'499 Messungen aufgezeichnet. Die Messungen wurden am Portal Nord, Mitte und Süd durchgeführt.

Portal Nord an der Gotthardpassstrasse

Die Abb. 44 stellt das Potentialfeld des gesamten Tunnelquerschnittes am nördlichen Portal grafisch dar. Die Messungen wurden durch die SGK erstellt mit gesamthaft 2'985 Messpunkten bei einem Messraster von 250 × 250 mm und erstrecken sich über eine Fläche von ca. 190 m². Die Messdaten zeigen zwei horizontale Streifen angedeutet mit einem deutlichen Potentialgradienten dazwischen. Bis zu einer Höhe von 1 m, über die gesamte Länge der Messung in beiden Richtungen, ist Streifen sichtbar, welcher signifikant negativere Potentiale aufweist. Dieses Merkmal ist typisch für einen im Gegenverkehr geführten Tunnel, da auf einer Seite Fahrzeuge von aussen Feuchtigkeit mit Chloriden in den Tunnel führen. Hingegen auf der gegenüberliegenden Fahrbahnseite haben die Fahrzeuge bereits am anderen Eintrittsportal (Abb. 51) einen Grossteil der mitgeführten Feuchtigkeit im Spritzwasserbereich verteilt. Folglich verstreuen sie beim Verlassen des Tunnels keine weiteren Chloride mehr. Ferner deutet sich ein Potentialsprung in vertikaler Richtung bei ca. 5 m an.



Abb. 44 Potentialfeld Gotthard Tunnel Portal Nord aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Wie schon vorgängig erwähnt hatte der Roboter grosse Mühe mit der Tunnelinnenseite und so sind nur wenige Messdaten erhoben worden. Die Abb. 45 stellt die aufgezeichneten Messdaten des Inspektionsroboters grafisch dar, insgesamt sind bei einem gleichen Messraster wie die Messung der SGK einzig 107 Messpunkte verfügbar. Die Messung wurde nicht exakt verortet, da aber der Roboter per Hand an der Tunnelinnenseite platziert worden ist, muss dieser entweder von der linken oder der rechten Seite gestartet sein. Es wird angenommen, dass sich dieser Bereich sich zwischen 0 und 7 m auf der Abszissenachse und zwischen 16 und 19 m auf der Ordinatenachse in der Abb. 44 befindet.



Abb. 45 Potentialfeldmessdaten aufgenommen durch den Roboter C2D2 am Portal Nord an der Gotthardpassstrasse mit einem Messraster von 250 × 250 mm, die schwarz umrahmte Fläche entspricht der Fläche in Abb. 48

Im Histogramm (Abb. 46) sind zwei deutliche Maxima erkennbar. Die Spitze mit dem tieferen Potential befindet sich bei ca. -300 mV CSE, die zweite Spitze bei ca. -100 mV CSE. Die beiden Spitzen können je einer gauss'schen Verteilung zugeordnet werden, welche passiv oder aktiv korrodierend ist. Die Spitze mit den negativeren Potentialen ist schmaler als diejenige mit weniger negativen Werten.

Die Abb. 47 zeigt das Histogramm der mit dem Inspektionsroboter gemessenen Potentialwerte. Im Vergleich zum Histogramm in Abb. 46 zeigt sich ebenfalls eine Spitze bei einem Wert von ca. -300 mV CSE wie bei den Messungen der SGK. Obwohl diese Messdaten des Roboters im Potentialfeld signifikant weniger Messdaten enthalten. Die Bereiche mit den positiveren Potentialwerten wurden vom Inspektionsroboter nicht gemessen da zu hoch über der Fahrbahn.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 46 Histogramm der Daten vom Portal Nord an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm (Abb. 44)



Abb. 47 Histogramm der Daten vom Portal Nord an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch den Inspektionsroboter in einem Messraster von 250 × 250 mm (Abb. 45)

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 48 (a) Frame aus dem Video der rückwärtsgerichteten Kamera auf dem Inspektionsroboter am Portal Mitte an der Gotthardpassstrasse und (b) Ausschnitt der PTZ-Kamera zum selben Zeitpunkt

Die Teilabbildung (Abb. 48 (a)) zeigt ein Einzelbild des Videos der rückwärtsgerichteten Kamera. Das Foto zeigt die überfahrene Fläche im Tunnel an, der entsprechende Teil der Potentialmessungen ist Abb. 45 mit einem schwarzen Rechteck markiert. Das Einzelbild der Überwachungskamera in Abb. 48 (b) wurde zum gleichen Zeitpunkt wie Abb.48a aufgenommen und zeigt die Betonoberfläche aus einem anderen Winkel. Die Potentialmesswerte zeigen deutliche negative Werte, auf der Oberfläche sind visuell keine Spuren von Korrosion zu entdecken.

Portal Mitte an der Gotthardpasstrasse

Die Potentialfeldmessdaten (Abb. 49), am Portal Mitte im Tunnel Costoni di Fieud aufgenommen und festgehalten durch die SGK, zeigen wiederum im Sprühnebel- und Spritzwasserbereich deutlich negativere Potentiale als im Tunnelfirst. Die Potentialfeldmesswerte im Tunnelfirst sind im Bereich von 150 mV CSE, hingegen im Spritzwasserbereich sind die Messwerte im Bereich von -150 mV CSE. Im Vergleich zu den Potentialfeldmessdaten am Portal Nord oder Süd sind Messwerte bei signifikant höheren Potentialen angesiedelt. Auffällig sind die beidseitigen Flächen, welche sich mit negativeren Potentialen in Richtung des Tunnelfirstes bewegen. Die Daten wurden in einem Raster von 250 \times 250 mm aufgezeichnet, dies ergab auf einer Fläche von ca. 180 m² zusammenfassend 2807 einzelne Messungen.

Die Messdaten aus dem Farbplot in Abb. 49 sind in der Abb. 50 als Histogramm darstellt. Wie das Ergebnis zeigt, sind zwei deutliche Spitzen erkennbar. Die Beobachtung mit den beiden Teilflächen deckt sich mit der Auswertung im Histogramm. Die negativere Spitze ist bei einem Wert von ca. -125 mV CSE, die zweite Spitze befindet sich ca. 250 mV CSE davon entfernt.



692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Abb. 49 Potentialfeldmessdaten an der Gotthardpasstrasse Portal Mitte aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm (Abb. 49)



Abb. 50 Histogramm des Portals Mitte an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm (Abb. 49)

Portal Süd an der Gotthardpassstrasse

Die Messdaten vom Südportal des Tunnels decken wiederum den gesamten Querschnitt ab und sind in der Abb. 51 als Potentialfeld grafisch dargestellt. Insgesamt sind über 2'800 Einzelmessungen vorhanden, welche in einem äquidistanten Raster von 250 × 250 mm aufgenommen sind. Der Mittelwert beträgt -378 mV CSE und deutet auf eine grossflächige Korrosion hin. Die Verteilung der Messwerte zeigt auf, dass in der Nähe der beiden Bankette im Spritzwasserbereich negativere Potentiale aufgezeichnet worden sind als im Scheitel des Tunnelgewölbes. In der Darstellung sind einige auffällige Punkte mit vergleichsweise hohen Potentialwerten vorhanden, welche höchstwahrscheinlich als Fehlmessungen interpretiert werden können, da diese einen sehr grossen Potentialsprung im Vergleich zu den Messwerten in der direkten Nachbarschaft aufweisen.

Die Abb. 52 zeigt das Histogramm der Potentialfeldmessdaten in Abb. 51. Die Form des Histogramms macht eine Spitze sichtbar, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit eine korrodierende Verteilung darstellt mit einem Mittelwert von ca. -450 mV CSE. Der Grossteil der Messwerte befindet sich im Bereich zwischen -600 und ca. -100 mV gegenüber der Referenzelektrode.



Abb. 51 Potentialfeldmessung an der Gotthardpassstrasse Portal Süd aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm



Abb. 52 Histogramm der Potentialfeldmessungen an der Gotthardpassstrasse am Portal Süd aufgenommen durch die SGK (Abb. 51)

Im Vergleich zu den beiden Messstellen im Tunnel Costoni di Fieud (Portal Nord und Mitte) sind beim südlichen Portal ausreichende Anzahl an Messpunkten verteilt auf einer Fläche vorhanden um die Werte mit den Messungen der SGK (Abb. 51) zu vergleichen. Die Messungen sind aus den Messfahrten 7,8,9 und 10 aus dem Tunnel zusammengesetzt und in Abb. 53 festgehalten. Die Messdaten lassen sich nicht eindeutig einer der beiden Seiten zuordnen, jedoch der generelle Trend zu Potentialfeldmesswerten um -500 mV CSE lässt sich in beiden Abbildungen deutlich erkennen. Wie bereits erwähnt hatte der Roboter grosse Probleme mit der Oberfläche im Tunnel und der Krümmung des Gewölbes sowie generell mit der Traktion. Das aufgenommene Potentialfeld des Roboters besteht nur aus einzelnen Linien und ist nicht vollflächig im gewünschten Raster aufgenommen im Vergleich zu den Messdaten der SGK.



Abb. 53 Potentialfeldmessdaten aufgenommen durch den Roboter C2D2 am Portal Süd an der Gotthardpassstrasse mit einem Messraster von 250 × 250 mm

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 54 Histogramm der Potentialfeldmessungen an der Gotthardpassstrasse am Portal Süd aufgenommen durch den Roboter C2D2 (Abb. 53)

Die vom Roboter aufgezeichneten Messdaten sind in Abb. 54 als Histogramm dargestellt. Die Form des Histogramms ist ähnliche wie dasjenige in Abb. 52 mit einer Spitze bei deutlich negativen Potentialen. Die vorliegende Spitze nochmals bei negativeren Potentialen bei ca. -457 mV CSE, da der Roboter die meisten Daten in der Nähe des Spritzwasserbereichs mit tieferem Potential aufgezeichnet hat. Der Roboter hat die weniger negativen Potentiale im Firstbereich nie erreicht.

5.1.5 Einsteinbrücke

Die Einsteinbrücke befindet sich auf dem Areal der ETH Zürich auf dem Campus Hönggerberg und wurde im Jahre 1973 fertiggestellt. Die Untersicht dieser Brücke wurde am 27.02.2014 mehrmals durch den Roboter abgefahren. Abb. 55 zeigt den Inspektionsroboter C2D2 an der Unterseite der Brückenplatte während einer Messfahrt. Durch die Wasserspur an der Unterseite des Hohlkastens kann man die bereits abgefahrene Strecke deutlich erkennen. Auf der Unterseite wurde derselbe Bereich zweimal abgefahren. Die beiden Messfahrten decken nahezu dieselbe Fläche ab und können direkt miteinander verglichen werden, um die Reproduzierbarkeit der Daten aufzuzeigen. Da sich die äusseren Einflüsse (Temperatur und Betonfeuchtigkeit), welche eine Verschiebung des gemessenen Potentials verursachen könnten, während eines Tages kaum verändert haben. Die Einflüsse auf die Potentialfeldmessung sind vorgängig in Kapitel 2 erläutert.

Die Potentialfelddarstellungen der beiden Messfahrten sind im Messraster von 250 × 250 mm in Abb. 56 (a) und (b) dargestellt. Die Potentialfeldmesswerte liegen zwischen +150 mV CSE und – 50 mV CSE in einen schmalen Potentialbereich. Mit der Auswertungssoftware wurden die beiden Messungen zu einer einzigen Messung (Abb. 57) zusammengefasst.



Abb. 55 C2D2 im Einsatz an der Einsteinbrücke am Campus Hönggerberg in Zürich mit der Spur der benetzten Betonoberfläche



Abb. 56 (a) Darstellung der Potentialfeldmessungen der ersten Fahrt (b) Darstellung der Potentialfeldmessdaten der zweiten Fahrt in einem Messraster von $250 \times 250 \text{ mm}$ (Abb. 56 (a),(b))

Die Abb. 57 zeigt die Überlagerung der beiden Messungen (Abb. 56a und b) mit insgesamt 242 Messpunkten in der Grafik. Der gemessene Bereich deckt eine Fläche von ca. 8 m² ab. Die erste Messfahrt markiert den linken Rand der Gesamtdarstellung, die zweite Messfahrt markiert den Startpunkt der Messungen. Sämtliche Messwerte befinden sich in engen Potentialfeldgrenzwerten, dies suggeriert, dass die Messwerte einer einzigen Verteilung folgen.



Abb. 57 Grafische Darstellung des Potentialfeldes unterhalb der Einsteinbrücke im ersten Bereich der Messung mit C2D2 mit einem Messraster von 250 \times 250 mm als Kombination der beiden Messfahrten (Abb. 56 (a),(b))



Abb. 58 Histogramm der Messwerte des C2D2 unterhalb der Einsteinbrücke (Abb. 58)

Gemäss dem aktuellen, visuellen Zustand des Bauwerks und dem Histogramm der Potentials in Abb. 58 wird angenommen, dass auf dieser Brückenuntersicht nicht mit Korrosionsschäden zu rechnen ist.

Das Histogramm der kombinierten Messung (Abb. 58) zeigt eine deutliche Spitze und eine enge Potentialfeldverteilung. Die statistische Auswertung zeigt, dass die Daten von einer einzigen Gaussverteilung beschrieben werden können (Abb. 59) welche den Potentialwerten des passiven Bewehrungstahls im Beton entspricht.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 59 Histogramm der Messdaten des C2D2 an der Europabrücke mit einer Gaussverteilung (Abb. 57)



Abb. 60 (a) Messfahrt mit dem Inspektionsroboter auf der Europabrücke (dunklere Spur) und (b) aufgezeichnete Potentialfeldmessdaten auf der Spur

Die visuelle Überprüfung der Oberfläche mit den gemessenen Potentialen und der Betonoberfläche findet sich in Abb. 60. Die dunklere, frischere Spur stammt von der aktuellen Messfahrt des Inspektionsroboters und verläuft nahezu parallel entlang des Abdruckes der Schaltafel an der Unterseite der Einsteinbrücke. Die aufgezeichneten Potentialwerte (Abb. 60b) liegen bei etwa + 50 mV CSE. Auf der Betonoberfläche sind zwischen dem Startpunkt der Messung und der aktuellen Position des Roboters auch visuell keine Unterschiede zu erkennen.

5.2 Möglichkeiten und Grenzen des Inspektionsroboters

Die Weiterentwicklung des "Paraswifts" zu einem Inspektionsroboter für Stahlbetonbauwerke ist gelungen. Die Hauptfunktionen für den Einsatz an Stahlbetonbauwerken konnten auf die vorhandene Plattform des Paraswifts übertragen werden. Die Schwerpunkte der Anpassungen waren die Entwicklung einer geeigneten Radelektrode für die Potentialmessungen, die Lokalisierung und die Verbesserung der Fortbewegung am Bauwerk. Für die während der Entwicklung entworfene Radelektrode konnte erfolgreich ein Patentantrag eingereicht werden (vergleiche Kapitel 4.3). Wie im vorherigen Kapitel beschrieben wurde der Roboter nach jedem Testlauf an einem realen Bauwerk weiter verbessert. Grosse Probleme bereitet nach wie vor eine horizontale Fahrt entlang einer Wand aufgrund der mangelhaften Traktion. Bei den Testläufen wurde vor allem die Funktionstüchtigkeit der Radelektrode überprüft und mit Handmessungen der SGK verglichen um darzulegen, dass die mit dem Roboter aufgenommen Messungen zum selben Resultat kommen wie die Handmessungen. Es sind softwareseitig Routinen vorhanden um einzelne Messfahrten miteinander zu verknüpfen und darzustellen. Für eine tiefergehende Analyse und Interpretation der Daten wurde eine halbautomatische Auswertung implementiert (vergleiche Kapitel 7.2) und anhand von einigen Beispielen geprüft. Einschränkend muss aber erwähnt werden, dass es sich beim vorliegenden Roboter zurzeit um einen Prototyp handelt. Die Überarbeitungen und Ergänzungen im Rahmen dieses Projektes zeigen einen deutlichen Fortschritt beim Prototypen. Die Funktionen zur selbstständigen Fahrt an Objekten sind nicht vorhanden. Im Folgenden werden Möglichkeiten und die Grenzen, sowie einige Funktionen detaillierter erläutert.

5.2.1 Fortbewegung und Platzierung am Bauwerk

Während der Entwicklung des C2D2 wurde die Manövrierfähigkeit an einer Wand in mehreren Schritten verbessert. Beispielsweise durch einen stärkeren Motor zum Antrieb des Impellers welcher höhere Anpressdrücke generiert und durch die Auswahl von anderen Antriebsrädern mit höherem Haftreibungsquotienten. Eine nahezu horizontale Fahrt entlang einer Betonmauer ist in den meisten Fällen möglich, aber die Position an der Mauer muss mittels einer vertikalen Bewegung fortwährend nachjustiert werden. Bei einigen Fahrten des Roboters wurde der Messbereich mittels Absaugen und leichtem Abspülen mit Wasser grob gereinigt um die Traktion an der Wand zu verbessern. Die Vorbereitung des Untergrundes auf der geplanten Messfläche zeigte allerdings wenig Wirkung und wurde wieder verworfen. Zudem wäre diese Methode an grösseren oder schwer zugänglichen Bauwerken kaum praktikabel gewesen. Schlussendlich wurde keine absolut befriedigende Lösung gefunden um sich nahezu horizontal an sämtlichen Wänden fortzubewegen.

Die besten Resultate für eine horizontale Bewegung an einer Wand konnten mit den «nail wheels» (Abb. 61 (a)) erreicht werden. Die Abnützung der Räder spielt bei der Traktion eine grosse Rolle, je neuer die verwendeten Räder waren, desto besser war die Traktion. Diese Beobachtung ist unabhängig vom benützten Radtypus. Der Wechsel der Räder ist recht aufwendig, eine revisionsfreundlichere Aufhängung wäre zu bevorzugen bei einer Neuentwicklung oder Reproduzierung der Grundplatte oder des gesamten Roboters.

Während des Entwicklungsprozesses waren Ideen vorhanden, die Fortbewegungsart von Rädern auf Raupen zu wechseln. Abb. 61 (b) zeigt schematisch den C2D2 mit Raupen zur Fortbewegung. Die Raupen hätten einige Vorteile in der Traktion gehabt, sind aber deutlich aufwendiger in der Handhabung und bei der Steuerung. Der Roboter wurde nie mit Raupen ausgestattet, obwohl deren Einsatz wiederholt in Betracht gezogen wurde zur Verbesserung der mangelhaften Traktion an horizontalen Betonoberflächen.

Der aktuelle Motor kann nicht während einer grossen Zeitspanne mit voller Leistung betrieben werden, da er zum Überhitzen neigt. Falls der Motor überhitzt, drosselt dieser automatisch seine Leistung. Der Roboter ist aus diesem Grund einmal während einer Testfahrt aus ca. 4 m Höhe abgestürzt. Eine Sicherung des Roboters über ein Seil oder Ähnlichem war nicht vorhanden. Deswegen fiel der Roboter ungebremst auf den Boden und erlitt beträchtlichen Schaden.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 61 Nail wheels des C2D2 für optimale Traktion an Bauwerken aus Stahlbeton und (b) Skizze von C2D2 mit Raupen statt Rädern

Darüber hinaus fehlen dem C2D2 weitere Fähigkeiten, welche vorwiegend der Sicherheit dienen. Der Roboter kann z.B. Hindernisse nicht selbstständig erkennen. Eine Erkennung von Hindernissen mit zusätzlichen Sensoren oder eine Hinderniserkennung anhand der beiden Kameras wurde nicht implementiert. An Infrastrukturbauwerken wie Brücken sind zahlreiche Hindernisse wie Leitungen, Befestigungen oder Eintrittslöcher zum Betreten des Hohlkastens vorhanden (Abb. 62 a). Wird der Roboter manuell per Fernbedingung gesteuert können diese erkannt werden. Unebenheiten der Betonoberfläche welche vom Operateur aus grösserer Distanz vom Boden aus nicht erkannt oder falsch eingeschätzt werden können zu einem Absturz des Roboters führen da auf dem graphischen Interface (GUI) auf dem Messcomputer keine Live-Bilder der beiden On-board-Kameras dargestellt werden können. Gelegentlich kann es auch vorkommen, dass sich Fronträder an einer Unebenheit (kleine Ecken oder Irregularitäten an der Betonoberfläche) blockieren. Das Blockieren der Räder konnte an horizontalen als auch an vertikalen Flächen beobachtet werden und verändert die Fahrtrichtung und senkt die Messgenauigkeit des Roboters, da sich dieser für einen kurzen Moment unkontrolliert bewegt.

Eine häufige Schwierigkeit war, dass die beiden Antriebsräder nicht gleichmässig an die Oberfläche gedrückt wurden. Die Traktion der beiden Räder ist somit unterschiedlich und der Roboter weicht von seiner geraden Fahrt ab und beginnt eine Bogenfahrt, was wiederum manuell korrigiert werden muss. Ein gleichmässiger Anpressdruck ist nur bei einer sehr starren Basisplatte möglich.

Ein weiteres Manko ist, dass der Roboter am Bauwerk nicht selbstständig z.B. von der Untersicht auf die Flanke (Abb. 62 (a)) wechseln kann. Der Roboter muss immer manuell ans neue Bauteil angebracht werden und die Messung muss von neu gestartet werden. Abb. 62 (b) zeigt ein notwendiges Gerüst zum Anbringen des Roboters an der seitlichen Wand des Hohlkastens. Andernfalls wäre der Roboter nicht in der Lage dort zu messen. Das Gerüst kann jedoch an einem strategisch günstigen Ort installiert werden und der Roboter kann dann zur gewünschten Messstelle fahren. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Platzierung nicht an sämtlichen Bauwerken möglich ist.

Der C2D2 wird zu diesem Zeitpunkt noch über die alte Fernsteuerung des Paraswifts gesteuert. Die Verbindung zum Roboter wird manchmal unterbrochen. Zur Verbesserung der Steuerung des Roboters kamen die Steuerung per WLAN und die Steuerung über eine neue Fernbedienung in Frage. Diese beiden Optionen wurden aber nie umgesetzt. Für die autonome oder die semi-autonome Steuerung des Roboters fehlen Sensoren zur Erkennung von Hindernissen oder Kanten oder eine entsprechende Implementierung in der Software auf dem Messcomputer. Daher wäre ein autonomes Fahren zum jetzigen Zeitpunkt ohne weitere Sensoren zur Sicherung des Roboters nicht möglich.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 62 (a) Hindernisse an einer Stahlbetonbrücke (z.B. Leitungen, Kanten, Schalungsüberstände und dgl.) und (b) Notwendiges Gerüst für die Platzierung des Roboters am Hohlkasten der Europabrücke

5.2.2 Lokalisierung des C2D2

Eine stationäre PTZ- Kamera verfolgt sämtliche Bewegungen des Roboters, indem sie die pinkfarbene Kugel verfolgt. Bei ungünstigen Lichtverhältnissen kann es vorkommen, dass die Kamera die pinke Kugel verliert oder nicht erkennt. Falls der Operator am Messcomputer feststellt, dass die Kamera dem Roboter nicht mehr folgt, kann dieser den Roboter anhalten lassen und mittels manueller Eingaben am Messcomputer die Kamera mit dem pinkfarbenen Ball zur Deckung bringen. Nach dieser Prozedur kann die Messung wie gewünscht wieder fortgesetzt werden. Eine weitere Fehlerquelle stellt das Zoomen der Kamera dar. Während des Zoomens ist das Kamerabild für einen Moment unscharf und erschwert die Detektion des pinkfarbenen Balles. Somit ist die Detektion je nach Winkel zwischen der Überwachungskamera und der Orientierung des pinken Balles zu derjenigen erschwert.

Beim Aufstarten des Gesamtsystems traten in einigen Fällen Probleme beim initialen Auffinden des C2D2 mit dem pinkfarbenen Ball auf der Messfläche auf. Das manuelle Auffinden war immer möglich. Ferner hat das Lokalisierungssystem zwei weitere Mängel. Erstens verliert die Kamera den Roboter häufig, wenn sich dieser in grosser Entfernung von der PTZ-Kamera befindet. Zweitens treten Probleme auf, wenn sich die Kamera bezüglich der vertikalen Neigung am oberen oder unteren Anschlag befindet.

Die Genauigkeit der Lokalisierung nach der Kalibrierung beträgt ca. ± 15 cm bei einem Abstand von 20 m von der PTZ-Kamera. Die Kamera muss so platziert werden, dass sie den Roboter während der Messung zu jedem Zeitpunkt verfolgen kann und die Distanz zum Roboter nicht zu gross wird, da die Auflösung der Kamera zu gering ist um den pinkfarbenen Styroporball in grosser Distanz mit hoher Genauigkeit zu detektieren. Eine einfache Platzierung der Überwachungskamera ist nicht immer möglich, hieraus wurde die Idee eines Iokalen Referenzsystems entwickelt. Eine exaktere Lokalisation ermöglichte die Einführung eines vom Kamerastandort unabhängigen Referenzsystems (vergleiche Kapitel 4.2.4, Abb. 17 (a), (b)). Wie bereits erwähnt wurde diese Funktionalität erst gegen Ende der Entwicklung zum Robotersystem hinzugefügt und hat demnach noch kaum Praxiserfahrung mit dieser Erweiterung des Inspektionsroboters.

Die Verortung der Messungen auf einem Plan ist noch nicht gelöst. C2D2 kann relativ zur PTZ-Kamera lokalisiert werden, aber eine Georeferenzierung ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorhanden. Somit sind die Messungen von Fall zu Fall gedreht im Vergleich zu Aufnahmen per Hand (Abb. 63 und Abb. 64). Dieses Manko tritt meistens bei Messungen über Kopf auf. Deshalb ist eine Gegenüberstellung mit Handmessungen teilweise schwierig, wenn die Startposition des Roboters nicht an einem bekannten Punkt erfolgt ist. Die Messungen können anhand der Aufzeichnungen der Kamera, den gemessenen

Potentialfeldwerten und dem Wissen, dass der Roboter bei Wänden immer von der Bodennähe gestartet sein muss, referenziert werden.



Abb. 63 Originale Aufnahmen des Roboters auf einer rechteckigen Fläche



Abb. 64 Aufnahmen von Abb. 63 nach einer Drehung um einen bestimmten Winkel zum Vergleich der Handmessungen mit den Messungen des Roboters

5.2.3 Potentialfeldmessung und Messradelektrode

Die Messung mit der entwickelten Radelektrode funktioniert äussert zuverlässig. Fehlmessungen wurden nur bei sehr trocknen Stellen an Bauteilen festgestellt da dann der elektrolytische Kontakt trotz Benetzung mit Wasser nicht ausreichend war. Ausserdem traten Fehlmessungen auf, wenn sich der Roboter auf glatten vertikalen Wänden aufgrund fehlender Traktion unkontrolliert bewegt hat. Im Nachhinein werden diese Messwerte mit der Software herausgefiltert.

Die Radelektrode befindet sich hinten in der Mitte des Roboters (Abb. 65). Verursacht durch diese geometrische Einschränkung kann die Radelektrode nicht 100 % der zu untersuchenden Fläche erreichen. Dasselbe Problem tritt bei überhängenden Flächen auf, da zum Rand eine gewisse Sicherheitsdistanz eingehalten werden muss um die Adhäsionskräfte aufrecht zu erhalten. Ein Überfahren eines Randes würde zum Absturz und des Roboters führen.



Abb. 65 Mögliche Route des Roboters zum Abfahren einer Fläche mit Sicherheitsmarge an Rändern als auch in der Nähe von Hindernissen

5.2.4 Visuelle Aufnahme der Oberfläche

Dank den zwei Videokameras (Abb. 11 (b)) wurde die Betonoberfläche vor und hinter dem Roboter kontinuierlich aufgezeichnet. An verschiedenen Testobjekten wurden aus dem Video einzelne Bilder zu definierten Zeitabständen extrahiert und gespeichert. In einem nächsten Schritt wurden diese einzelnen Bilder mit einem Algorithmus zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Das beschriebene Vorgehen ähnelt dem Vorgehen, welches bereits beim Paraswift zum Erstellen von Panoramabildern verwendet worden ist (vergleiche Kapitel 4.1) mit dem Unterschied dass beim C2D2 die aus dem Video extrahierten Bilder sich teilweise sehr ähnlich sind was das Zusammenfügen erschwert. Der Vorteil einer fixen Kameraposition bei einer ebenen Fläche ist, dass die entsprechende Transformationsmatrix zur Entzerrung der Bilder sich nicht ändert. Somit kann dieselbe Transformationsmatrix für sämtliche Einzelbilder aus dem Video verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Erstellung der Bilder, bei besser zugänglichen Messstellen, stellt eine Aufnahme der Untersuchungsoberfläche mit einer externen Fotokamera dar, welche eine höhere Auflösung aufweist als die beiden fix installierten Kameras auf dem Roboter. Wie im vorherigen Abschnitt beschriebenen können die einzelnen Bilder zu einem Panoramabild zusammengesetzt werden. In einem nächsten Schritt muss das Panoramabild manuell entlang zweier rechtwinkliger Kanten entzerrt werden, sowie auf die Messfläche zugeschnitten werden. Die Schritte sind in Abb. 67 exemplarisch dargestellt, der Overlay mit den Potentialfeldmessdaten vom Garagentor ist in Abb. 28 gezeigt.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



(C)

Abb. 66: Illustration des Zusammenfügens einzelner Bilder zu einem Panoramabild mit Entzerrung: (a) Einzelbilder, (b) Panoramabild ohne Entzerrung und (c) entzerrtes Panoramabild

5.2.5 Gewicht des Roboters

Bei der Weiterentwicklung des Roboters wurde dieser im Vergleich zum Paraswift wegen den zusätzlichen Bauteilen immer schwerer. Die Gewichtszunahme ist mit ein Grund für die verminderte Traktion, da der Brushlessmotor des Impellers erst zu einem späteren Zeitpunkt durch ein leistungsfähigeres Modul ersetzt wurde. Dem ungeachtet besteht die Möglichkeit, dass der Roboter an einigen Stellen durch Optimierung wieder an Gewicht verliert wie zum Beispiel beim Stromkonverter.

Beim Aufwärtsfahren an einer Wand muss der Roboter zunehmend mehr Gewicht nach sich ziehen aufgrund des Gewichts der Versorgungskabel. Je nach Traktion der Räder an der Oberfläche wird früher oder später eine Höhe erreicht, wo sich der Roboter nicht mehr weiter nach oben bewegen kann. Daher kann am Bauwerk nicht jede gewünschte Stelle erreicht werden, wenn der Roboter am Bauwerk hinauffährt. Dieses Problem kann umgangen werden, indem der Roboter den Bauwerksteil immer nur von oben nach unten abfährt. Der Roboter müsste jedoch nach jeder Fahrt wieder nach oben transportiert werden was nicht mit der Zielsetzung übereinstimmt.

5.2.6 Datenverbindung

Die Verbindung zwischen dem Roboter und dem Messcomputer funktioniert über WLAN. Die Verbindung ist in den meisten Fällen stabil, jedoch stellt sich die Frage, ob die Datenverbindung über ein Kabel nicht besser wäre. Eine kabelgebundene Verbindung zum Roboter ist ohnehin vorhanden und zwingend für die Durchführung der Potentialfeldmessung. Probleme mit dem WLAN traten beim Transferieren von grossen Datenmengen auf, z.B. wenn die beiden Onboard-Kamera in Betrieb sind. Dann wurde die Übertragung der Potentialmessdaten die Datenverbindung nahezu blockiert. An dieser Stelle muss kritisch hinterfragt werden, ob eine Aufzeichnung mit den Onboard-Kameras wirklich mit 24 Bildern pro Sekunde erfolgen muss. Allenfalls würden in regelmässigen Abständen (weg- oder zeitbasiert) erhobene Einzelbilder für die meisten Anwendungen ausreichen, wie beispielsweise bei der vorgestellten Erstellung eines Panoramabildes aus einzelnen Frames der On-board-Kameras.

5.2.7 Auf-und Abbau und Betrieb des Systems

Für den Betrieb des Roboters werden aktuell zwei Personen benötigt. Eine Person überwacht die Messung am Computer während dem die andere Person die Steuerung des Roboters per Fernbedienung übernimmt. Die Zeit zur Inbetriebnahme des ganzen Systems hängt stark von der Erreichbarkeit der Messfläche ab. Übliche Installationszeiten für zwei geübte Personen an einer einfach zugänglichen Stellen bis zur ersten Potentialfeldmessung betragen ca. 30 min, der Abbau kann in ca. 10 min erledigt werden.

6 Resultate der Potentialfeldmessungen

6.1 Europabrücke

Die Europabrücke verbindet die beiden Quartiere Altstetten und Höngg in Zürich miteinander und wurde im Jahr 1964 fertiggestellt. An der Europabrücke war der Roboter an drei Flächen mit unterschiedlichen Neigungen an der Unterseite der Brücke im Einsatz. Die Flächen waren eine Seitenwand des Hohlkastenträgers, die Unterseite der auskragenden Platte und die Unterseite des Hohlkastens des Brückenträgers (Abb. 67). Der gefährlichste Einsatzort des Roboters an diesem Bauwerk war die Seitenwand, da aufgrund der mangelhaften Traktion ein Abrutschen an der Wand direkt zum Absturz des Roboters führen kann. Der Roboter war für insgesamt 3 Stunden im Einsatz. An der für den Roboter einfachsten Messstelle, der horizontalen Untersicht (Abb. 67 Fläche 3), wurden während 90 Minuten Potentialfeldmessdaten aufgezeichnet. Der Fokus lag auf der Kabelführung zum Roboter während der Messfahrten. Danach wurde auf die Fläche 2 gewechselt, an welcher für weitere 60 Minuten gemessen wurde. Besonders herausfordernd an dieser Fläche war, dass sie eine leichte Neigung aufweist (Abb. 67 Fläche 2), somit ist die Positionierung der Überwachungskamera erschwert. Als Letztes wurde an der gefährlichsten Stelle (Fläche 1) gemessen, wie erwartet hatte der Roboter Mühe die gewünschte Route abzufahren.



Abb. 67 Einsatz C2D2 an der Europabrücke in Zürich mit den drei Messstellen: Steg (1), Kragplattenuntersicht (2) und Kastenboden (3)



Abb. 68 Plan der Messstelle an der Europabrücke mit den drei Messstellen (Abb. 67)

6.1.1 Steg der Europabrücke

Der Roboter hat nicht die gesamte Fläche am Steg der Europabrücke abgefahren sondern nur die rechteckig umrahmte Fläche (Abb. 69). Dieser Teilbereich deckt eine vergleichsweise kleine Fläche der Messungen der SGK ab, welche in Abb. 69 als Farbplot dargestellt ist. Deshalb ist ein quantitativer, direkter Vergleich der beiden Resultate nicht möglich. Die Darstellung der Messwerte verdeutlicht, dass am Steg quer zur Fahrbahn jeweils Abschnitte mit leicht negativerem Potential vorhanden sind. Anhand dieser Beobachtung lässt sich ein möglicher Schluss ziehen, dass es sich bei diesen Orten um Fahrbahnübergänge oder ähnliches handelt.



Abb. 69 Potentialfeld am Steg der Europabrücke aufgenommen durch die SGK im Raster von 150 x 250 mm vom 05.03.2014 mit markiertem Feld der Robotermessungen

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Auf der Betonoberfläche wurden per Hand total 571 Messpunkte aufgenommen. In der Abb. 70 ist das Histogramm der Messungen dargestellt. Die Daten zeigen eine deutliche Spitze bei 125 mV CSE sowie eine zweite kleinere Spitze bei ca. -50 mV CSE. Die Messungen decken einen Bereich von ca. 25 m² ab, bei einem gewählten Messraster von 150 x 250 mm.

Wie schon erwähnt decken die Messungen des Roboters einen Teilbereich des SGK Messungen ab. Für den direkten Vergleich werden im Folgenden dieselben Ausschnitte des Bauwerks miteinander verglichen. Deswegen zeigt die Abb. 71 erneut ein Histogramm der Messdaten der SGK, welches nur auf den Messdaten des rechteckig markierten Ausschnittes basiert. Im Ausschnitt befinden sich 144 Messpunkte verteilt über einen Potentialbereich von 500 mV.



Abb. 70 Histogramm der Potentialfeldmessdaten der Europabrücke am Steg vom 05.03.2014 aufgenommen durch die SGK im Messraster 250 x 250 mm



Abb. 71 Histogramm der Potentialfeldmessdaten der Europabrücke am Steg vom 05.03.2014 aufgenommen durch die SGK im Messraster 150 x 250 mm des schwarz umrahmten Bereiches in Abb. 69

Am Steg der Europabrücke wurde von der SGK eine zweite Messung durchgeführt welche einen anderen Teilbereich des Steges abdeckt. In vertikaler Richtung wurden in Abständen von 0.5 m Potentialfeldmessdaten aufgezeichnet. Das Messfeld beträgt ca. 6 m², die Potentialfelddarstellung ist in Abb. 72 dargestellt. Insgesamt sind auf der Fläche 78 Messpunkte vorhanden, da entsprechende Histogramm mit einem Mittelwerte von 36 mV ist in Abb. 73 dargestellt. Die Klassenbreite im Histogramm beträgt 10 mV.



Abb. 72 Potentialfeld am Steg der Europabrücke aufgenommen durch die SGK im Raster von 500 x 150 mm vom 05.03.2014



Abb. 73 Histogramm der Potentialfeldmessdaten der Europabrücke am Steg vom 06.05.2014 aufgenommen durch die SGK (Abb. 72)

Die Messdaten, aufgenommen durch den Inspektionsroboter, sind in Abb. 74 in einem Messraster von 250 × 150 mm dargestellt. Eine mögliche Ursache für diese Abweichung liegt bei der Ungenauigkeit der Lokalisation des Roboters, welche bereits vorgängig erläutert worden ist. In Abb. 75 ist das Histogramm der insgesamt 166 Messpunkten aus Abb. 74 zu sehen. Das Histogramm zeigt keine ausgeprägte Spitze und erstreckt sich hauptsächlich über den Potentialbereich zwischen -250 mV und 0 mV CSE.


692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Abb. 74 Potentialfeld am Steg der Europabrücke aufgenommen durch den Inspektionsroboter im Raster von 250 x 150 mm



Abb. 75 Histogramm der Potentialfeldmessdaten am Steg der Europabrücke (Abb. 74) aufgenommen mit C2D2 im Messraster 250 x 150 mm

6.1.2 Untersicht der Kragplatte

An der Untersicht der Kragplatte an der Europabrücke wurden Potentialfeldmessungen durch die SGK durchgeführt. Das Messraster betrug 500 x 150 mm und die Messungen befinden sich im selben Querschnitt der Hohlkastenbrücke (vergleiche Abb. 67). Die Messfläche betrug ca. 13 m². Die Abb. 76 zeig den Farbplot der Messungen, wobei pro Messpunkt eine quadratische Fläche von 250 x 150 mm zugeordnet wurde.

Das Histogramm der Potentialfeldaufnahmen der SGK (Abb. 76) ist mit einer Klassenbreite von 10 mV in Abb. 77 dargestellt. Bei ca. 150 mV zeigt sich eine Spitze, die Messdaten erstrecken sich über einen Potentialbereich von ca. 250 mV.



692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Abb. 76 Potentialfeld an der Untersicht der Kragplatte der Europabrücke aufgenommen durch die SGK im Raster von 500 x 150 mm vom 05.03.2014



Abb. 77 Histogramm der Potentialfeldmessdaten der Europabrücke an der Untersicht der Kragplatte vom 06.05.2014 aufgenommen durch die SGK (Abb. 76)

6.1.3 Kastenboden

Beim letzten Messstandort an der Europabrücke handelt es sich um den Kastenboden. Die aufgenommenen Potentialfeldmessdaten der SGK sind in Abb. 78 als Potentialfeld in einem Farbenplot gezeigt. Die Einflussfläche pro Messpunkt beträgt 250 x 150 mm. Die Messfläche erstreckt sich über einen Bereich von 1.25×6 m bei einem Messraster von 150×500 mm. Die 96 Einzelmessungen am Kastenboden sind in der Abb. 79 als Histogramm dargestellt. Wie bei den vorherigen Histogrammen beträgt die Klassenbreite 10 mV. Die Messdaten befinden sich zwischen -150 mV CSE und 120 mV CSE und zeigen bei ca. 65 mV CSE eine Häufung.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 78 Potentialfeld des Kastenbodens der Europabrücke aufgenommen durch die SGK im Raster von 500 x 150 mm vom 05.03.2014



Abb. 79 Histogramm der Potentialfeldmessdaten der Europabrücke am Kastenboden vom 06.05.2014 aufgenommen durch die SGK (Abb. 78)

6.2 Gotthardpassstrasse

An der Gotthardpassstrasse wurden Potentialfeldmessungen an unterschiedlichen Infrastrukturbauwerken durchgeführt. Die Messungen teilen sich wie folgt auf: Messungen an einer Brücke, im Tunnel (vergleiche Kapitel 5.1.4) und in einer Galerie. Im Folgenden werden zuerst die Resultate der Potentialfeldmessungen an der Unterseite sowie an einer Wand der Galerie gezeigt. Sämtliche Messungen sind in einem äquidistanten Raster von 250 × 250 mm dargestellt. Die Histogramme jeweils mit einer Klassenbreite von 10 mV.

6.2.1 Untersicht der Galerie

Die Messungen der SGK an der Untersicht der Galerie sind in Abb. 80 dargestellt. Die dargestellte Fläche beträgt rund 50 m². Die meisten Potentialfeldmesswerte befinden sich zwischen –200 und 100 mV CSE. Die vorliegenden Daten zeigen einen ausgeprägten Sprung der Potentialwerte bei einer horizontalen Distanz von 3 m (Abszissenachse). Die Untersuchung zeigt weiter, dass sich auf der linken Hälfte der Messung bei 3.75 m auf der Abszissenachse zwischen 6 und 8 m auf der Ordinatenachse einige Messwerte befinden, welche einen im Vergleich zur Umgebung deutlich höheren Potentialmesswert aufweisen. Dabei könnte es sich um eine Verschiebung im Potential handeln, weil die verwendete Elektrode nicht mit derselben Anpresskraft auf die Betonoberfläche gedrückt

worden ist, oder dass die Benetzung der Oberfläche unterschiedlich ist im Vergleich zu den vorherigen Messlinien an der Deckenunterseite der Galerie.



Abb. 80 Potentialfelddarstellung der Untersicht in der Galerie am Gotthard der SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm mit eingezeichneter Fläche, an welcher entsprechende Robotermessungen vorliegen

Die 891 Potentialfeldmesspunkte aus Abb. 80 sind in der Abb. 81 als Histogramm dargestellt. Insgesamt sind im Histogramm über 800 einzelne Messungen dargestellt. Es sind deutlich zwei Peaks sichtbar, derjenige mit dem tieferen Potential liegt bei ca. - 150 mV CSE, der Zweite befindet sich bei ca. 25 mV CSE.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 81 Histogramm sämtlicher Potentialfeldmessdaten der SGK am Gotthard an der Untersicht in der Galerie



Abb. 82 Zusammengesetzte Messung des C2D2 an der Untersicht der Galerie mit einem Messraster von 250 × 250 mm (entsprechend der Fläche im markierten Feld in Abb. 80)

Der Inspektionsroboter C2D2 hat ebenfalls an der Untersicht der Galerie Potentialfeldmessdaten erhoben auf einer Teilfläche der Potentialfeldmessdaten der SGK von ca. 20 m² (Abb. 82), dies entspricht rund einen Fünftel der Messfläche der SGK. Diese Messungen decken den schwarz umrahmten Bereich in Abb. 80 ab. Die aufgezeichneten Potentialwerte liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Messungen der SGK. Trotz einer nicht ganz exakten Verortung zeigen die Messungen des Roboters denselben Übergang von leicht positiven Potentialen zu einer Teilfläche mit leicht negativen Potentialen in der horizontalen Richtung wie in Abb. 80. Abb. 83 stellt das Histogramm der Potentialfeldmessdaten des Inspektionsroboters aus Abb. 82 dar. In der Grafik sind zwei deutlich ausgeprägte Häufigkeitspeaks dar bei ca. -110 mV CSE und im Bereich um 0 mV CSE. Insgesamt sind beim gewählten Raster 208 Mittelwerte von Potentialfeldmesspunkten vorhanden.



Abb. 83 Histogramm der Potentialfeldmessdaten aufgenommen durch den Inspektionsroboter an der Untersicht der Galerie an der Gotthardpassstrasse (Abb. 83)



Abb. 84 Histogramm der Potentialfeldmessdaten auf derselben Fläche wie die Robotermessungen aufgenommen durch die SGK an der Untersicht der Galerie an der Gotthardpassstrasse (Abb. 80)

Für den Vergleich der Werte im Histogramm muss bei beiden Messungen die gleiche Datenbasis vorhanden sein. Deshalb wird für die Gegenüberstellung einzig der Teil der Messungen berücksichtigt, welche deckungsgleich mit den Messungen des C2D2 sind. Das Histogramm der Messungen der SGK im schwarz umrahmten Bereich ist in Abb. 84 dargestellt. Die beiden Histogramme (vergleiche Abb. 83 und Abb. 84) zeigen einen ähnlichen Verlauf mit jeweils zwei Häufigkeitsverteilungen. Dabei sind die Spitzen unterschiedlich stark ausgeprägt. Im Vergleich zu den Robotermessungen ist die Spitze bei den Messungen der SGK bei Werten um -40 mV stärker ausgeprägt. Diese Diskrepanz lässt sich im Farbplot erklären: der Roboter hat auf der linken Messseite

deutlich weniger Messdaten aufgezeichnet, dies führte zu weniger Messwerten bei eher positiven Potentialen im Vergleich zu den Messungen der SGK auf der ganzen Messfläche.

6.2.2 Gotthard Galerie Messung

Weitere Messungen der SGK wurden an derselben Galerie im Wandbereich durchgeführt (Abb. 85). Aus der Grafik wird sichtbar, dass sich sämtliche Potentiale in einem kleinen Wertebereich befinden. Die Messungen decken einen Bereich von ca. 50 m² ab. Im oberen rechten Bereich in der Abbildung 85 befindet sich eine Fläche von ca. 2 m² wo vergleichsweise negativere Potentialwerte zu finden sind.



Abb. 85 Potentialfelddarstellung eines Wandbereichs der Galerie an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch die SGK

Es liegen keine Vergleichsmessungen mit dem C2D2 Roboter vor. Die Messdaten können jedoch als weiterer Datensatz für die halbautomatische Auswertung verwendet werden. Abb. 86 zeigt das Histogramm der Messdaten im Wandbereich der Galerie an der Gotthardpassstrasse. Im Histogramm ist eine Häufung bei einem Wert von -25 mV CSE zu erkennen.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 86 Histogramm der Potentialfeldmessdaten eines Wandbereiches einer Galerie an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch die SGK (Abb. 85)

6.2.3 Galeriewand an der Gotthardpassstrasse

Die Abb. 87 zeigt eine Darstellung der Potentialfeldmesswerte der Galeriewand an der Gotthardpassstrasse als Farbenplot. Die Daten wurden durch die SGK in einem Messraster von 250 × 250 mm erhoben. Aus der Grafik geht hervor, dass sich im Streifen auf der Ordinatenachse zwischen den Werten 4 und 5 m deutliche negativere Potentiale befinden als im Rest der Wand. Dieser Bereich umfasst den Fussbereich der Galeriewand der sich im Sprühnebel- und Spritzwasserbereich befindet und mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich mehr mit Chloriden beaufschlagt wurde als die höher liegenden Bereiche der Betonwand. Auch die Feuchtigkeit ist hier vermutlich höher. Diese These wird unterstützt durch einen Übergangsbereich zu höheren Potentialwerten im oberen Bereich der Betonmauer.



Abb. 87 Potentialfelddarstellung der Wand in der Galerie an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm mit eingezeichneter Fläche, an welcher entsprechende Robotermessungen vorliegen

Die einzelnen Messpunkte aus der Abb. 87 lassen sich in einem Histogramm darstellen (Abb. 88). Das Histogramm zeigt eine deutliche Spitze bei ca. 100 mV CSE und deutet eine Breite Verteilung von Messwerten bei deutlich negativeren Potentialen an. Mithilfe des Potentialfelds lässt lassen sich diese Werte eindeutig dem unteren Bereich der Mauer zuordnen.





Abb. 88 Histogramm der Potentialfeldmessdaten einer Galeriewand aufgenommen durch die SGK an der Gotthardpassstrasse (Abb. 87)

Der C2D2 hat auf einer Fläche von 20 m², welche ein Teilbereich der Fläche aus Abb. 87 abdeckt, Potentialfeldmesswerte aufgezeichnet. Die Messwerte sind in Abb. 89 grafisch dargestellt, der gemessene Bereich ist in Abb. 87 schwarz umrahmt. In den Resultaten des Roboters lässt sich derselbe Übergang von negativeren Potentialen im unteren Bereich zu positiveren Potentialen im oberen Bereich der Betonmauer feststellen wie bei den Messungen von Hand. Bei den Robotermessungen sind viele Lücken in den Messungen vorhanden, eine vollflächige Aufzeichnungen der Daten durch den Roboter war nicht möglich.



Abb. 89 Potentialfelddarstellung der Messdaten des Inspektionsroboter C2D2 an der Galeriewand an der Gotthardpassstrasse

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Die Grundlage für einen Vergleich der aufgenommen Potentialfeldmesswerte bildet die Gegenüberstellung der Histogramme mit einzelnen Spitzen. Der gerahmte Bereich in Abb. 87 zeigt den Bereich an, in welchem sowohl Handmessung als auch Messungen mit dem Inspektionsroboter vorliegen. Die beiden Histogramme sind in Abb. 90 und Abb. 91 dargestellt. Die Grafiken zeigen unterschiedliche Charakteristiken. Die Messungen der SGK zeigen eine ausgeprägte Spitze bei ca. 50 mV CSE und wenige Messungen bei Werten von weniger als 100 mV CSE. Hingegen die Messungen des Inspektionsroboters zeigen zwei Spitzen in einem Abstand von ca. 80 mV zueinander.



Abb. 90 Histogramm der Potentialfeldmessdaten auf derselben Fläche wie die Robotermessungen aufgenommen durch die SGK an der Galeriewand an der Gotthardpassstrasse (Abb. 87)



Abb. 91 Histogramm der Potentialfeldmessdaten aufgenommen durch den Inspektionsroboter an einer Wand der Galerie an der Gotthardpassstrasse (Abb. 89)

7 Auswertung Potentialfeldmessdaten

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Methoden zur Festsetzung der Grenzwerte für Korrosion aus den Potentialfelddaten kurz vorgestellt. Anschliessend wird die in dieser Arbeit entwickelte und an Beispielen durchgeführte halbautomatische Auswertung präsentiert. Hervorzuheben ist, dass die in diesem Kapitel präsentierte Auswertung der Potentialfeldmessdaten unabhängig davon ist, wie die Daten aufgezeichnet worden sind, sei dies nun mit dem Inspektionsroboter oder mittels händischen Verfahren.

7.1 Festlegung der Grenzwerte

In der Literatur werden verschiedene Verfahren für die Auswertung von Potentialfeldmessdaten vorgeschlagen mit jeweiligen Vor – und Nachteilen. Die unterschiedliche Festsetzung der Grenzwerte für Korrosion führt demnach zu voneinander abweichenden Ergebnissen bei der Interpretation. Die Einteilung in Flächen mit korrodierender Bewehrung und in Teilflächen mit passiver Bewehrung ist von grosser Bedeutung für die weitere Planung der Erhaltungs- und Instandsetzungsmassnahmen des Bauwerks. Das Vorgehen bei der Festlegung der Grenzwerte für die Auswertung von Potentialfeldmessdaten hat sich im Laufe der Zeit verändert, die Forschungsarbeiten in der Schweiz haben dazu massgeblich beigetragen.

7.1.1 Grenzwerte nach ASTM

Die ASTM International (ursprünglich American Society for Testing and Materials) schlägt fixe Grenzwerte für das Potential zur Abgrenzung von Bereichen mit hoher und niedriger Korrosionswahrscheinlichkeit vor (Tab. 1). Die Grenzwerte basieren auf einer grossen Anzahl von Messungen in den USA [34] wo die Exposition des Bauwerks und die Bauweise relativ ähnlich waren. Eine unkritische Übernahme dieser spezifischen Grenzwerte als "universelle" Grenzwerte führte zu verschiedenen Fehlinterpretationen.

Tab. 1 Korrosionswahrscheinlichkeit der Potentialfeldmesswerte nach ASTM C876 C [34]		
Potential [mV CSE]	Korrosionswahrscheinlichkeit [%]	
-200>	<10	
-350 bis -200	unbekannt	
<-350	>90	

7.1.2 Grenzwerte nach RILEM

Das Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (RILEM) hat ihrerseits eine Empfehlung für die Interpretation von Potentialfeldmessdaten erstellt. Die Empfehlung wurde von einem RILEM Technical Committee «Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion» erarbeitet und im Jahr 2003 publiziert. Das wichtigste Resultat der Empfehlung war, dass bei der Auswertung von Potentialfeldmessdaten keine fixen Grenzwerte angewendet werden können. Die Grenzwerte sollen bauwerksspezifisch anhand der Potentialfeldmessdaten bestimmt werden. Dieser Paradigmenwechsel von fixen Grenzwerten zu adaptiven Grenzwerten ist teilweise basierend auf wissenschaftlichen Arbeiten in der Schweiz. [35] Die Richtlinie empfiehlt für die Darstellung der Potentialfeldmessdaten Histogramme und Summenhäufigkeitskurven zu verwenden. Die Informationen im Histogramm sollen einen ersten Überblick über den Mittelwert und die Verteilung der Messwerte geben. Für eine detailliertere Auswertung werden die Summenhäufigkeitskurven verwendet, in welchen einzelne gauss'sche Verteilungen als Geraden sichtbar sind. Jedoch wurde kein Konsens bei der mathematischen Bestimmung der Grenzwerte erreicht.

7.1.3 Grenzwerte nach SIA 2006

Die SIA hat ihrerseits im Merkblatt 2006 "Planung, Durchführung und Interpretation der Potentialmessung an Stahlbetonbauten" [36] ein Schema zur Auswertung von Potentialfeldmessdaten erstellt. Die Auswertung der Potentialfeldmessdaten basiert auf dem Summenhäufigkeitsdiagramm (Grafiken in Abb. 92 und Abb. 93). Die SIA Richtlinie postuliert im Wahrscheinlichkeitsnetz zwei Geraden, je eine für die aktive und die passive gauss'sche Verteilung, einzuzeichnen. Dabei wird zwischen folgenden 3 Bereichen unterschieden: (i) geringe Korrosionswahrscheinlichkeit, (ii) Übergangsbereich und (iii) hohe Korrosionswahrscheinlichkeit. Diese Methode folgt keiner exakten mathematischen Beschreibung und erfolgt rein grafisch. Somit ist die Zuteilung in die drei Kategorien von der Erfahrung der mit der Auswertung beauftragten Person abhängig. Entsprechend nimmt die vorgestellte Methode implizit an, dass an der Messfläche korrodierende und nicht korrodierende Bereiche vorhanden sind, was bei Bauwerken oder Bauwerksteilen nicht in jedem Fall zutreffend sein muss.

Die Grundidee dieses Verfahrens ist, dass man versucht die zusammengehörenden Messwerte (gauss'sche Verteilungen) zu erkennen. Die Steigung der Tangente im umso grösser, je enger die Verteilung der Messwerte (kleinere Standardabweichung) ist. Gemäss Kapitel 4.4 des SIA Merkblattes 2006 sollen ergänzende Untersuchen helfen die Ursachen und den Grad der Bewehrungskorrosion zu ermitteln. Ergänzende Untersuchen sind beispielsweise Sondieröffnungen oder die Resultate von Chloridprofilen an entnommenen Bohrkernen. Für die Interpretation der Daten müssen zusätzlich korrosionschemische Einflussgrössen, bauwerksabhängige Faktoren und gegebenenfalls verzinkte oder freiliegende Stahlteile berücksichtigt werden. [36]

An dieser Stelle muss betont werden, dass diese vorgestellte Art der Auswertung stark von der Summenhäufigkeitskurve der Potentiale (vergleiche Abb. 93) abhängt. In einigen Fällen lassen sich die beiden Tangenten für hohe und niedrige Korrosionswahrscheinlichkeit im Diagramm nicht eindeutig erkennen. Dies erschwert die Bestimmung der Grenzwerte für Korrosion bzw. passive Bewehrung, oder lässt den Übergangsbereich über einen grossen Potentialbereich anwachsen



Abb. 92 Häufigkeitsverteilung der Potentialwerte [36]



Abb. 93 Summenhäufigkeit der Potentialwerte im Wahrscheinlichkeitsnetz (Abb. 92) [36]

7.2 Halbautomatische Auswertung

Die hier erarbeitete halbautomatische Auswertung der Potentialmessdaten soll die Auswertung auf eine mathematische Grundlage stellen und so weit als möglich von der beauftragten Person unabhängig machen. Das Verfahren kann unabhängig von der Art der Messung (Inspektionsroboter oder von Hand) angewandt werden. Die halbautomatische Auswertung benötigt die Potentialfeldmessdaten in einer Tabelle und das Messraster.

7.2.1 Zweck der halbautomatischen Auswertung

Mit der halbautomatischen Auswertung soll der auswertenden Person ein direkter Output in Form von leicht lesbaren Grafiken gegeben und die Auswertung vereinfacht werden. Der entwickelte Algorithmus ermöglicht eine Aufbereitung der Daten gemäss einem standardisierten Ablauf. Dies stellt insofern eine Erleichterung dar, als sämtliche Outputs der halbautomatischen Auswertung in derselben graphischen Form erscheinen. Zudem erhält die Analyse Angaben über die Orte der Korrosionsherde und eine Übersicht, ob und viel Prozent der ausgemessenen Fläche möglicherweise von Korrosion der Bewehrung betroffen ist. Des Weiteren wird das aufwendige Curve-Fitting automatisch durchgeführt und weitere Diagramme für die Auswertung werden bereitgestellt.

7.2.2 Curve-Fitting Verfahren

Bereits 1992 wurde vorgeschlagen mathematische Verteilungen durch die gemessenen Potentialwerte zu fitten um Grenzwerte zwischen korrodierenden und nicht korrodierenden Flächen an Hand eines Modelles zu berechnen [37]. Die fixen Grenzwerte für die Zuteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit standen stets unter Kritik, daher wurde 2009 von Guilkers und Elsener ein mathematisches Verfahren basierend auf statistischen Auswertungen vorgeschlagen [38]. Das Verfahren berechnet mittels nicht-linearer Regression zwei Gaussverteilungen im Histogramm der Potentialwerte sowie die Wahrscheinlichkeit zu einer der beiden Verteilung zu gehören. Somit lassen sich direkt Schranken für die passiven und aktiven Potentialwerte (Abb. 94) angeben. Dabei werden

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

folgende 4 Parameter optimiert: die Mittelwerte μ_1 und μ_2 und die Standardabweichungen σ_1 und σ_2 der beiden Gaussverteilungen. Die Autoren weisen darauf hin, dass für eine repräsentative statistische Auswertung 1000 und mehr Datenpunkte vorliegen sollten. Somit kann für jedes Potential eine Wahrscheinlichkeit der Korrosion nach Gleichung (1) berechnet werden.

$$P_{\rm corr}(E) = \frac{p_{\rm corr}(E)}{p_{\rm pas}(E) + p_{\rm corr}(E)}$$
(1)

Abb. 94 zeigt eine Zuteilung der Bereiche im Histogramm nach der Berechnung der Grenzwerte für die passive und die aktive Verteilung der Potentialmesswerte mit der nicht-linearen Regression. Bei dieser Darstellung liegt der Mittelwert der korrodierenden Verteilung bei ca. -380 mV CSE und diejenige der passiven Verteilung bei ca. -280 mV CSE. Dazwischen befindet sich ein Übergangsbereich, in welchen in diesem Fall keine detaillierte Zuteilung des Korrosionsrisikos mit Gleichung (1) erfolgt ist. Der Anteil der korrodierenden Bewehrung ist deutlich kleiner als derjenige der passiven Bewehrung. [38]



Abb. 94 Häufigkeitsverteilung von Messdaten und eine mögliche Einteilung in korrodierende Bereich, passiven Bereich und in einen Zwischenbereich [38]

7.2.3 Entwickelter Algorithmus für die halbautomatische Auswertung

Der entwickelte Algorithmus für die halbautomatische Auswertung führt im Wesentlichen ein Curve-Fitting durch. Als Erweiterung zum oben beschriebenen Verfahren nach Guilkers und Elsener wird nicht mehr nur von zwei Verteilungen (aktiv und passiv) ausgegangen, sondern es sind mehrere Gaussverteilungen möglich. In diesem Algorithmus wird an Hand definierter Parameter eine zu verifizierende Anzahl an Gaussverteilungen unmittelbar vorgeschlagen. Die Anzahl der Verteilungen kann 1,2 oder 3 betragen. Die Überprüfung der Auswertung und der Interpretation erfolgt durch den Ingenieur nach dem Durchlauf des Algorithmus mit ergänzenden Untersuchungen auf der Messfläche.

Die halbautomatische Auswertung läuft gemäss fünf Schritten in Abb. 95 ab; mit der vorgeschlagenen Variante sollen automatisch die Grenzwerte für die Lokalisierung der korrodierenden Bereiche bestimmt werden. Das Verfahren ist eine modifizierte Version nach Guilkers und Elsener [38] vorgestellten Methode. Nach der Bestimmung des Grenzwertes für Korrosion werden die Daten nach Korrosionswahrscheinlichkeit dargestellt, damit die Interpretation seitens Auftraggeber oder Ingenieur schnell und korrekt erfasst wird.



Abb. 95 Schritte der statistischen Analyse von Potentialfeldmessdaten

Die ersten beiden Schritte sind analog wie bei der üblichen Auswertung von Potentialfeldmessdaten, nach dem Einlesen der Messwerte werden diese in einem Farbdiagramm dargestellt. Die Daten können mit einem gewöhnlichen Excelformat übergeben werden. Das Excelformat wird vom Benutzer manuell mit wenigen Klicks in die Software MATLAB von MathWorks eingelesen. Danach muss noch die Rasterweite in horizontaler und vertikaler Richtung definiert werden. Im nächstem Schritt wird die statistische Auswertung durchgeführt mit zwei unabhängigen Routinen in MATLAB (vergleiche Abb. 96). Die erste Routine führt eine iterative Optimierung durch und entscheidet je nach den berechneten Parametern, ob es sich um eine, zwei oder drei Gaussverteilungen handelt. Sofern der Ingenieur mit der halbautomatischen Auswertung nicht zufrieden ist, kann er manuell nachoptimieren. Diese Implementierung weist eine grössere Freiheit bezüglich der Wertebereichen der Parameter auf. Bei der zweiten (manuellen) Routine kann bei Bedarf: der Startpunkt für die Iteration sowie eine obere und untere Schranke für den Wertebereich der 5 Parameter (p, μ_1 , σ_1 , μ_2 , σ_2) angegeben werden. Dabei wird lediglich der Fall mit zwei unabhängigen Gaussverteilungen abgedeckt.

-150 -100 I [mV CSE] -150 -100 il [mV CSE] 200 -150 -100 -{ Potential [mV CSE] -200 -1 Potential I 200 250 -250 8 40 40 80 40 20 8 8 8 8 8 8 8 8 [%] b^{Kt} [%] b^K ь^{кон} [%] -200 (al [mV CSE] [mV CSE] CSEI ESC: 2m -200 Potential | 200 00 400 400 400 (-) No Häufigkeit (-) elative Häufigkeit [-] (-] hiəybihuēH əvdalər ⇔ 0 ← ພ ເຊ + -200 ial [mV CSE] [mV CSE] **nV CSE** 300 -200 200 400 -400 Poten 10-3 400 400 (-) tiekgituëH evitelen relative Häufigkeit [-] [-] fiaxlgituëH avitetan ⊷ ∽ ∽ ≁ Anzahl Messdaten in einer Verteilung> 95% gen > 60 mV Gaussverteilung mit ardabweichug > 150mV Standardabweichug > Standardabw Fit . Übernahme r Parameter Evtl. Übernahme der Parameter Evtl. L

Abb. 96 Auswertung mit der halbautomatischen Auswertung Schritt 3 und 4

Drei Gaussverteilungen (1 korrodierend und 2 passiv) können in folgenden Fällen (z.B. Galerierückwand, Tunnelwände, allgemein Stahlbetonbauwerke mit stark unterschiedlichen Feuchtigkeiten) auftreten: je eine Verteilung für den korrodierenden Bereich, für einen feuchten passiven und trockenen passiven Bereich. Die Anzahl der Verteilungen kann somit von der Exposition der unterschiedlichen Messbereiche an einem Bauwerk abhängen.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Anknüpfend an den vorausgegangenen Überlegungen und die benötigen Übergänge zwischen einzelnen Korrosionsrisiken für die Darstellung der Korrosionswahrscheinlichkeit im vierten Schritt der halbautomatischen Verwertung der Information müssen die Schranken gemäss Formel (1) berechnet werden. Dabei werden die folgenden Werte für die Wahrscheinlichkeiten für die Korrosion der Bewehrung verwendet: <10%, 10–50%, 50-90% und >90%. Die Potentialfeldmesswerte im Zwischenbereich werden anhand dieser Schranken eingeteilt (Abb. 97).



Abb. 97 Beispiel der Zuordnung nach Korrosionsrisiko im Überlappungsbereich der angenommenen Verteilungen für Korrosion und Passivität der Bewehrungseisen

Falls zwei Verteilungen vorliegen, entspricht eine Korrosionswahrscheinlichkeit von 50 % genau dem Schnittpunkt der aktiven und der passiven Verteilung. Bei drei Verteilungen hängt das Korrosionsrisiko von den berechneten Parametern der drei Verteilungen ab, wobei der Übergang zwischen der aktiven und derjenigen passiven Verteilung mit kleinerem Mittelwert wichtig ist. Die Darstellung erfolgt im Farbenplot anhand der Korrosionswahrscheinlichkeit anstatt der Höhe des Potentialfeldmesswertes. Mit dieser adaptierten Interpretation lässt sich der Überlappungsbereich zwischen der korrodierenden und der passiven Verteilung einer Wahrscheinlichkeit für Korrosion zuordnen und grafisch darstellen.

Die Abb. 98 zeigt einen Teil der möglichen Exporte der halbautomatischen Auswertung. Ausgehend von den Potentialfeldmessdaten über das Curve-Fitting zur Darstellung des Korrosionsrisikos weiter zur Bestimmung der Flächenanteil der korrodieren und nicht korrodierenden Bereiche.



692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Abb. 98 Exporte aus der halbautomatischen Auswertung: (a) Darstellung der Potentiale als Potentiale, (b) Histogramm mit dem Curve-Fitting, (c) Zuordnung des Korrosionsrisikos zu den Potentialfeldwerten und (d) Tortendiagramm der Flächenzuteilung entsprechend dem Korrosionsrisiko

Um sich nachträglich einen visuellen Eindruck der Betonoberfläche zu verschaffen sowie allfällige Rostspuren oder markante Risse zu entdecken kann auf die Videoaufnahmen der beiden Kameras auf dem Roboter zurückgegriffen werden. Zum jetzigen Zeitpunkt verfügt die Auswertungssoftware aber über keinen Algorithmus welcher die Videobilder automatisch den Potentialmessungen zuordnet. Ebenso existiert noch kein Verfahren, das auf den Bildern automatisch Rostflecken etc. detektieren und visuell aufbereiten kann.

Der Overlay zwischen dem Potentialfeld oder dem Oberflächenzustand wurde bereits in einem vorhergehenden Kapitel gezeigt. Nach der Analyse lässt sich der Overlay zwischen den Daten und der Oberfläche erneut darstellen. Anstatt der Überlagerung der Daten mit den absoluten Werten der Potentialfeldmessdaten kann eine Überlagerung oder Gegenüberstellung mit dem Korrosionspotential stattfinden (vergleiche Anhang Abb. 1).

7.3 Ausgewählte Beispiele zur halbautomatischen Auswertung

In diesem Kapitel werden verschiedene Beispiele der halbautomatischen Auswertung und der erhaltenen Resultate an unterschiedlichen Objekten vorgestellt. Dabei werden die Potentialmessdaten gemäss dem Ablaufplan des entwickelten Algorithmus (Abb. 96) abgearbeitet und je ein Beispiel gezeigt. Die Durchführung der halbautomatischen Auswertung ist unabhängig davon, ob die Daten mit dem Roboter oder von Hand erhoben worden sind. Die Praxisbeispiele zeigen sowohl Roboterdaten als auch Handmessungen.

7.3.1 2 Gaussverteilungen am Steg der Europabrücke

Bei den meisten Potentialfeldmessungen wird a priori davon ausgegangen, dass zwei unterschiedliche Potentialverteilungen vorliegen, bzw. dass ein (kleiner) Teil der Bewehrung korrodiert. In diesem Beispiel (Stege an der Europabrücke) wird ein Vergleich zwischen der Auswertung gemäss SIA Merkblatt [36] und der in dieser Arbeit entwickelten halbautomatischen Auswertung gezeigt.



Abb. 99 Grenzwertbestimmung nach SIA Merkblatt 2006 [36] (-22 und 115 mV CSE für die Grenzwerte für Korrosion und keine Korrosion) für die Messungen am Steg der Europabrücke durch die SGK (vergleiche Abb. 93)

Eine Bestimmung der Grenzwerte nach SIA Merkblatt [36] in der Summenhäufigkeitsgrafik ist am Beispiel des Steges an der Europabrücke exemplarisch durchgeführt (Abb. 99). Die Darstellung der Messdaten als Potentialfeld findet sich in Abb. 69. Der Grenzwert für Korrosion wurde zu -22 mV CSE bestimmt und der Grenzwert für die passive Bewehrung zu 115 mV CSE. Eine Analyse der Verteilung der Messwerte in die 3 vorgestellten Kategorien nach SIA Merkblatt 2006 in Tab. 2 zeigt, dass über die Hälfte der Messwerte im Zwischenbereich liegt und somit keine Aussage zum Korrosionsstatus erlaubt. Somit kann über 50 % der Fläche nicht eindeutig einem Bereich zugeordnet werden. Der Zwischenbereich könnte mit weiteren Untersuchungen verkleinert werden, aber ein grosser Teil der Potentialfeldmessung wird nicht verwertet.

Fab. 2 Grenzwertbestimmung mit der Methode SIA am Steg der Europabrücke			
Wert [mV CSE]	Anzahl [-]	Anzahl aller Messdaten [%]	
<-22	87	15.2	
-22 bis -115	331	58.0	
>115	153	26.8	
	571	100	

Im Histogramm (Abb. 100) sind deutlich zwei Maxima zu erkennen, die mit zwei Gaussverteilungen (grün: passive Bereiche, rot: korrodierende Bereiche) gefittet wurden. Das Maximum der Verteilung ist bei den positiveren Potentialen (passive Bereiche) stärker ausgeprägt. Die passive Verteilung ist deutlich schmaler als die Verteilung der aktiv korrodierenden Bereiche. Die Daten teilen sich ungefähr zur Hälfte in die aktive und die passive Verteilung ein. Die Kennwerte der Verteilungen sind der Abb. 100 zu entnehmen: der Mittelwert der passiven Verteilung liegt bei + 113 mV CSE, der Mittelwert der korrodierenden Verteilung bei + 13 mV CSE.



Abb. 100 Auswertung der Potentialfeldmessdaten aufgenommen durch die SGK am Steg an der Europabrücke mit den zwei Gaussverteilungen für den korrodierende und die passive Verteilung der Messwerte

Ein Vergleich mit der Auswertung nach dem SIA Merkblatt zeigt, dass der obere Grenzwert nach SIA ziemlich genau dem Mittelwert der angenommenen passiven Verteilung entspricht. Der untere Grenzwert nach SIA ist um ca. 30 mV CSE negativer als derjenige, welcher mit dem statistischen Verfahren berechnet wurde. Des Weiteren deckt sich das Ergebnis der Standardabweichung mit der Beobachtung, dass die Standardabweichung der passiven Verteilung einen kleineren Wert als diejenige der korrodierenden Verteilung aufweist (Steigung im Summenhäufigkeitsdiagramm ist steiler).

Mit Gleichung (1) kann nun der Übergangsbereich in ein Korrosionsrisiko umgerechnet werden, bei einem Potential + 100 mV CSE ist das Korrosionsrisiko geringer als 10 %. Abb. 101 (a) zeigt nun die Korrosionswahrscheinlichkeit der einzelnen Punkte im Potentialmessfeld nach der statistischen Zuordnung – dies ist das Resultat und eine erste Interpretation durch die halbautomatische Auswertung. Die Einteilung der Messwerte in

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

die verschiedenen Gruppen hängt von der (willkürlichen) Festsetzung des prozentualen Korrosionsrisikos ab. Die Auswertung in Abb. 101(a) und (b) zeigt eine Zuordnung nach dem ermittelten Korrosionsrisiko. Rund 55 % der Fläche ist nicht von Korrosion betroffen, hingegen 35 % der Fläche hat ein Korrosionsrisiko von 90 % und mehr. Im Anhang in Abb. 2 ist das Histogramm der Messdaten an der Europabrücke (aufgenommen durch die SGK in einem Messraster von 250 x 250 mm) und dessen Auswertung mit drei zugrunde-liegenden Gaussverteilungen dargestellt.



Abb. 101 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit abgestuft in vier Bereiche; (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a) bezogen auf die Fläche der Bereiche, Steg der Europabrücke mit zwei Gaussverteilungen

7.3.2 Widerlagerwand in Luterbach - eine Gaussverteilung

An der Widerlagerwand in Luterbach ist aufgrund der im Kapitel 5.1 beschrieben elektrischen Chloridentfernung und Schutzmassnahmen keine Korrosion (mehr) vorhanden. Die Abb. 102 zeigt erneut das aufgenommene Potentialfeld des Inspektionsroboters bei einem äquidistanten Messraster von 250 × 250 mm. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen Durchlauf durch die halbautomatische Auswertung mit einigen Outputs.

Die Kurvenanpassung und die Überprüfung während der halbautomatischen Auswertung hat zum Ergebnis geführt, dass hier eine einzige Gaussverteilung vorliegt. Die Verteilung hat einen Mittelwert von – 1.8 mV CSE bei einer Standardabweichung von 36.7 mV CSE. Mit weiteren Informationen über das vorliegende Bauwerk und dem Mittelwert bei nahezu 0 mV kann, wie erwartet, von einer passiven Verteilung ausgegangen werden. Eine gauss'sche Verteilung zeigt genauso die Auswertung nach der zweiten elektrochemischen Chloridentfernung (Abb. 30). Auf eine Darstellung des Potentialfeldes als Risikoplot und als Tortendiagramm wird verzichtet, da diese Grafiken keinen Mehrwert bei der Interpretation bieten würden. Eine genauere Betrachtung des Potentialfelds (Abb.

102) zeigt, dass sich ein Grossteil der negativeren Potentialmessdaten im unteren Teil der Widerlagerwand befinden. Diese Tatsache könnte dem Faktor der höheren Feuchte in der Nähe der Fahrbahnoberfläche geschuldet sein.



Abb. 102 Messung an der Widerlagerwand in Luterbach mit dem C2D2 am 10.04.2014 mit einem Messraster von 250 × 250 mm



Abb. 103 Histogramm mit einer Gaussverteilungen für die Widerlagerwand in Luterbach aufgenommen durch den Inspektionsroboter C2D2 mit einem Raster von 250 × 250 mm (Abb. 102)

7.3.3 Portal Mitte an der Gotthardpassstrasse - 3 Gaussverteilungen

Ein ausgezeichnetes Beispiel für das Vorliegen von 3 Gaussverteilungen ist das Portal Mitte des Tunnels an der Gotthardpassstrasse. Die Abb. 104 zeigt erneut den Farbenplot der Potentialfeldmessdaten. Eine erste Interpretation der Messdaten ist in schon Kapitel 5.1.4 vorhanden.

Die Auswertung der Daten mit der halbautomatischen Auswertung führte weder mit einer als auch mit zwei angenommen Verteilungen zu einem zufriedenstellenden Ergebnis. Vor der manuellen Intervention wurde a Apriori angenommen, dass den Messpunkten näherungsweise 3 Gaussverteilungen zugrunde liegen. Das Ergebnis der Kurvenanpassung mit 3 Gaussverteilungen ist in Abb. 105 dargestellt. Die Gaussverteilungen 1 und 2 sind passive Verteilungen, wobei die Gaussverteilung 1 am meisten Messwerte enthält. Die prozentuale Verteilung der Messdaten in die Verteilungen 1 bis 3 ist wie folgt: 49.6, 18.1 und 32.4 %. Die charakteristischen Werte der Verteilungen sind dem Diagramm zu entnehmen.





Abb. 104 Potentialfeldmessdaten an der Gotthardpasstrasse Portal Tunnel Mitte aufgenommen durch die SGK mit einem Messraster von 250 × 250 mm



Abb. 105 Histogramm mit drei Gaussverteilungen für das Portal Mitte im Tunnel Costoni di Fieud aufgenommen durch die SGK mit einem Raster von 250 × 250 mm (Abb. 104)

Die Zuordnung der Potentialfeldmesswerte nach Risiko zeigt Übergänge zwischen dem höchsten Korrosionsrisiko teilweise über beide Zwischenstufen des definierten Risikos. Im Überlappungsbereich der Potentialfeldmesswerte zwischen der Gaussverteilung 3 und Gaussverteilung 2 wird die Summenkurve nicht zu stark durch eine Spitze einer

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Verteilung geprägt, daher resultiert ein solch deutlich erkennbarer Übergangsbereich. Die Abb. 104 hat diese Übergänge bereits farblich angedeutet und wurden in Abb. 106 durch die detaillierte Analyse deutlich hervorgehoben.

Wiederum zeigt die halbautomatische Auswertung, dass im Firstbereich des Tunnels mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Korrosion zu erwarten. Die Ursache für den Ausläufer der korrodierenden Bereiche bei 4 m auf der horizontalen und zwischen 2 und 5 m auf der vertikalen Achse bleibt unbekannt, es wird aber ein sehr hohes Risiko für Korrosion angezeigt. Schlussendlich wird bei 60 % der Fläche keine Korrosion erwartet, 26 % der Fläche ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von der Bewehrungskorrosion betroffen. Bei der Zuordnung befinden sich einige "rote" Punkte mit dem höchsten Korrosionsrisiko in Potentialbereichen, welche der geringsten Korrosionsrisikostufe zugeordnet sind (grün) – ohne Übergangsbereich. Diese Punkte können als Fehlmessungen identifiziert werden, verursacht möglicherweise durch eine unzureichende Benetzung der Oberfläche oder geringen Anpressdruck der Elektrode.



Abb. 106 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft; (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a) bezogen auf die Fläche mit Messwerten für das Portal Mitte im Costoni di Fieud aufgenommen durch die SGK mit einem Raster von 250 × 250 mm (Abb. 104)

7.4 Vorteile und Schwierigkeiten bei der halbautomatischen Auswertung

Die Auswertung von Potentialfeldmessdaten, gemäss dem entwickelten Algorithmus, erlaubt eine unabhängig von der Eingabe standardisierte Ausgaben in Form von unterschiedlichen Diagrammen. Der Einsatz der vorgestellten Methode lenkt die auswertende Person in den meisten Fällen auf die wahrscheinlichste Anzahl an Verteilungen. Die Methode ist unabhängig vom Messraster oder der Art der Aufzeichnung der Messdaten.

Positiv zu bewerten ist, dass die halbautomatische Auswertung im Gegensatz zur Methode nach SIA 2006 auf einer klaren mathematischen Grundlage beruht. Somit ist die Auswertung der Potentialmessdaten weniger von subjektiven Einflüssen der auswertenden Person abhängig. Dies kann am Beispiel der Summenhäufigkeitskurve des Tunnelportals Mitte am Costoni di Fieud (Abb. 107) gezeigt werden (Histogramm siehe Abb. 105), welche nach der Methode SIA 2006 nicht eindeutig ausgewertet werden könnte.



Abb. 107 Summenhäufigkeitsdiagramm des Portal Mitte am Costoni di Fieud aufgenommen durch die SGK in einem Messraster von 250 x 250 mm (Abb. 49)

Zusätzlich positiv zu werten ist, dass die halbautomatische Auswertung eine unterschiedliche Anzahl an Gaussverteilungen berücksichtigen kann. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an unterschiedliche Bauwerke oder Bauwerksbereiche, insbesondere wenn unterschiedliche Feuchtigkeiten oder Karbonatisierung im Überdeckungsbeton vorliegen. Der Algorithmus ermittelt die Anzahl der Verteilungen selbständig. Die errechneten Grafiken welche exportiert werden passen sich automatisch den Potentialfeldmessdaten an.

Falls der Benutzer mit dem Ergebnis nicht zufrieden ist, sind mehrere Optionen denkbar. Einerseits könnte der Ingenieur den Potentialfelddatensatz gemäss dem lokalen Mikroklima am Bauwerk unterteilen, z.B. in einen Teil mit trockenem und einen mit feuchtem Beton. Danach kann die halbautomatische Auswertung auf die beiden Teil- Datensätze angewendet werden. Andererseits könnte der Ingenieur die manuelle Methode verwenden, um die Grenzpotentiale der einzelnen Korrosionsstufen mit der Eingabe von Starparametern für die Kurvenanpassung zu bestimmen. Bei Bedarf wäre es möglich die unteren und oberen Grenzwerte für die Grenzpotentiale in der Routine anzupassen.

Die Bestimmung der Grenzwerte mittels des entwickelten Algorithmus zeigt sich als ziemlich robust gegenüber einer Variation der Anzahl Potentialmessdaten. Im Anhang befinden sich einige Auswertungen von Potentialfeldern an Infrastrukturbauwerken, in welchem ein direkter Vergleich zwischen Robotermessungen und Handmessungen der SGK möglich ist. Meistens decken die Messungen der SGK eine deutlich grössere Messfläche ab, daher liegt eine grössere Anzahl von Daten für die halbautomatische Auswertung vor. Für die direkte Gegenüberstellung der Robotermessungen und der Messungen der SGK wurden deckungsgleiche Flächen verglichen, um zu zeigen, dass beide Messmethoden (erwartungsgemäss) zum selben Resultat kommen. Die meisten Unterschiede befinden sich in den Übergangspotentialen zwischen Bereichen mit hohem und niedrigem Korrosionsrisiko. Bei weniger Messdaten sind die Übergangsbereiche weniger ausgeprägt.

Besonders bei der manuellen Auswertung mit 3 Gaussverteilungen durch den Ingenieur ist Vorsicht geboten. Weil keine Einschränkungen bezüglich des Wertebereichs der Parameter der drei Gaussverteilungen möglich sind kann es vorkommen, dass eine der drei Gaussverteilungen lediglich der Minimierung des Berechnungsfehlers bei der Iteration dient (vergleiche Abb. 109 (c)), aber keinen physikalischen Sinn hat.

In einzelnen Fällen, so zum Beispiel bei der Auswertung der Potentialfeldmessdaten des südlichen Tunnelportals (Abb. 108) traten Schwierigkeiten auf.





Die Auswertung des Histogramms in Abbildung 109 (a) mit nur einer Gaussverteilung liegt führt zu einer unrealistisch hohen Standardabweichung (Breite) der Kurvenanpassung von 109 mV. Der entwickelte Algorithmus entscheidet, dass zwei Gaussverteilungen erforderlich sind (Abb. 109 (b)). Die Standardabweichungen beider Gaussverteilungen erreichen das vorgegebene Maximum (80 bzw. 60 mV für korrodierende und passive Bereiche), was nicht als sinnvolle Lösung betrachtet werden kann.

Werden hingegen drei Gaussverteilungen für ein Curve-Fitting verwendet, enthält die Gaussverteilung 3 lediglich 4.1 % aller Messwerte. In diesem Fall diente diese dritte Verteilung einzig der Reduzierung des mathematischen Fehlers bei der Berechnung und ist keine Repräsentation einer Potentialverteilung am Objekt. Die Standardabweichungen der beiden anderen Verteilungen erscheinen auch in dieser Berechnung unrealistisch hoch.

Um zu einem klaren Ergebnis zu kommen müssten die Potentialmessdaten mit Informationen aus anderen Messungen kombiniert werden, um ein genaueres Bild des Korrosionszustandes der Bewehrung zu erhalten. Sinnvoll wären Messungen des elektrischen Betonwiderstands um den Feuchtezustand des Betons zu eruieren. Weiter wären Informationen zum Chloridgehalt in verschiedenen Höhen ab Strassenniveau hilfreich. Eine Variation der beiden Parameter Feuchte und Chloridgehalt könnte die als unrealistisch taxierten Standardabweichungen erklären.



692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Abb. 109 Kurvenanpassung mit einer unterschiedlichen Anzahl von Gaussverteilungen am Tunnelportal Süd: (a) 1 Gaussverteilung, (b) 2 Gaussverteilungen und (c) 3 Gaussverteilungen verteilungen

Zusammenfassend hat die Anwendung der halbautomatischen Auswertung an einer Vielzahl von unterschiedlichen Bauwerken (vergleiche Anhang) gezeigt, dass der entwickelte Algorithmus in den allermeisten Fällen zu einem sinnvollen Ergebnis führt. Damit wird der Ingenieur (oder die Fachperson Potentialmessungen) bei der Auswertung der Potentialmessdaten sehr stark unterstützt und subjektive, personenbezogene Einflüsse auf die Auswertung entfallen. Falls in Zukunft Potentialmessungen mittels Roboter oder sonst in grosser Zahl erfolgen sollten wird mit dem Algorithmus und den resultierenden Karten mit dem Korrosionsrisiko eine rasche Auswertung möglich. Weiter erlauben die Korrosionsrisiko Karten einen quantitativen Vergleich zwischen den Potentialmessdaten über die Zeit, da diese nicht von den Absolutwerten des Potentials beeinflusst werden. Die Potentialfeldmessdaten des Roboters führen wie erwartet zum gleichen Ergebnis wie die händisch aufgenommenen Potentialfeldmessdaten.

8 Umsetzung

8.1 Vorgehensweise für die Umsetzung an Bauwerken

Die Vorbereitungen der Messungen mit dem Inspektionsroboter unterscheiden sich nicht wesentlich von den Vorbereitungen der Handmessungen. Anstatt das gewünschte Messraster auf die Oberfläche anzubringen muss im Vorfeld der Messungen ein geeigneter Standort für die Überwachungskamera eruiert werden. Die Kriterien für den Standort sind die Distanz und Einsehbarkeit der Messfläche für die Überwachung des Inspektionsroboters.

Bei der Durchführung der Messung sind die Unterschiede marginal. In beiden Fällen werden über die Messfläche verteiltet die Daten erhoben, seien dies nun Einzelmessungen am definierten Raster oder das Abfahren der Oberfläche mit dem Roboter. Beim der kontinuierlichen Aufnahme mit dem Roboter werden die Messungen im Nachhinein auf das gewünschte Messraster angepasst. Dies erfolgt durch die Berechnung des Mittelwertes an jedem Rasterpunkt. Die Hauptschwierigkeit beim aktuellen Stand des Inspektionsroboters besteht im manuellen Abfahren des gewünschten Messrasters.

In beiden Fällen können die Potentialfeldmessdaten und das Raster in x-und y-Richtung an die halbautomatische Auswertung übergeben werden. Diese Auswertung liefert eine erste Interpretation der Daten basierend auf einer statistischen Auswertung. Die Routine entscheidet anhand vordefinierter Kriterien, in wie viele gauss'sche Verteilungen die Daten eingeteilt werden sollen. In den meisten hier getesteten Anwendungsfällen erwies sich die vom Algorithmus definierte Anzahl an Gaussverteilungen als sinnvoll für das vorliegende Bauwerk oder Bauwerksteil. Das Curve-Fitting bildet anschliessend die Grundlage für die Bestimmung der Grenzwerte für die Korrosion.

Die wichtigsten Aspekte für die Anwendung des Inspektionsroboters in der Praxis sind in den vorherigen Kapiteln kurz beleuchtet worden. Der C2D2 ist nach wie vor ein Prototyp und hat die Praxisreife trotz den Anpassungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes noch nicht erreicht. Die grössten Probleme liegen im Fahren und Steuern an realen (d.h. meist verschmutzten) vertikalen Wänden oder Tunnelgewölben auf, da der Anpressdruck der Räder zu gering und daher die Traktion ungenügend ist. Der Roboter kann nicht wunschgemäss durch den Operateur gesteuert werden und ein Abfahren der Oberfläche zur Aufnahme von Potentialfeldmessdaten im gewünschten Messraster ist oft nicht möglich. Diese Problematik zeigt sich in sämtlichen Farbplots mit Rasterpunkten ohne Potentialfeldmesswert von Roboterdaten

Der Vergleich der Roboterdaten in Kombination mit der halbautomatischen Auswertung mit Handmessungen der SGK hat gezeigt, dass die Potentialfeldmessdaten zum selben Schluss führen. Der Nachweis für die Verwendbarkeit und Zuverlässigkeit des Roboters inklusive der entwickelten Radelektrode ist erbracht.

8.2 Schlussfolgerung

Der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus für die halbautomatische Auswertung der Potentialmessdaten wurde erfolgreich an einer Vielzahl unterschiedlicher Bauwerkstypen und damit Potentialfeldern angewandt. Abgesehen von vereinzelten Datensätzen hat sich die Auswertung als robust gegenüber der Anzahl der Daten oder dem verwendeten Messraster gezeigt. In den allermeisten Fällen liefert die Routine eine vernünftige Abschätzung der Anzahl an Gaussverteilungen für die weitere Auswertung der Daten. Als Output liefert der Algorithmus eine leicht verständliche Karte des Korrosionsrisikos, welche dem Ingenieur eine erste Interpretation erlaubt und auch die Grundlage für weitere zerstörungsfreie oder zerstörende Messungen am Bauwerk bildet.

Der Inspektionsroboter C2D2 hat sein grosses Potential und ist auch international auf sehr grosses Interesse gestossen. [39, 40] Im Rahmen dieses Forschungsprojektes

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

konnte der Roboter auf verschiedensten Praxisobjekten getestet und weiter verbessert werden. Die rasante Entwicklung bei den Plattformen für solche Systeme (z.B. Drohnen) hat den C2D2 technisch überholt. Drohnen könnten möglicherweise das grösste Problem des bestehenden Systems Roboters lösen, nämlich die Traktion. Das Förderprogramm ETH Grants hat im Dezember 2017 einen Forschungskredit für die Entwicklung einer Drohne als Trägerplattform für die Potentialfeldmessung zur Inspizierung von Bauwerken gesprochen. [41] Damit ist bestätigt, dass sowohl das Thema "Roboter in der zerstörungsfreien Bauwerksinspektion" als auch die beteiligten Institute IfB und ASL für weitere Forschungsarbeiten geeignet sind.

Anhänge

1	Testobjekte	105
I.1	Einsteinbrücke	105
I.2	Europabrücke	105
I.2.1	Steg der Europabrücke	105
1.2.2	Vergleich mit Robotermessungen	108
1.3	Objekte an der Gotthardpassstrasse	109
I.3.1	Untersicht der Galerie	109
1.3.2	Gotthard Galerie Messung im Wandbereich	112
1.3.3	Galeriewand an der Gotthardpassstrasse	113
1.3.4	Tunnel Costoni di Fieud	117
1.4	Widerlagerwand in Luterbach	121

I Testobjekte

I.1 Einsteinbrücke

Die halbautomatische Auswertung angewendet auf die Potentialmessdaten der Einsteinbrücke zeigt, dass eine einzige, passive Verteilung vorliegt. Auf die Darstellung der Daten als Korrosionsrisikoplot wird aus diesem Grund verzichtet. An diesem Testobjekt soll nochmals der Overlay zwischen Potentialfeld (bzw. Korrosionsrisikodarstellung) und der visuellen Aufnahme der Betonoberfläche gezeigt werden. Abb. 1 zeigt die (a) ein Foto der Oberfläche aus einer Kamera auf dem Inspektionsroboter, und (b) das Korrosionsrisiko der Bewehrung entlang der Spur nach der Auswertung. Auf der Oberfläche der Untersicht sind keine rostigen Spuren zu entdecken.



Abb. 1 (a) Messfahrt mit dem Inspektionsroboter auf der Europabrücke (dunklere Spur) und (b) Korrosionsrisiko der Potentialfeldmesswerte auf der Spur

I.2 Europabrücke

I.2.1 Steg der Europabrücke

Die Auswertung mit 2 Gaussverteilungen wurde bereits ist in Kapitel 7.3 präsentiert.

Ergänzend ist in Abb. 2 das Resultat mit drei angenommen Gaussverteilungen dargestellt. Zusätzlich zur Einteilung in korrodierende und passive Bereiche tritt eine dritte Verteilung auf, die Feuchteeinflüsse im Beton mit der passiven Bewehrung reflektiert. Anhand des Mittelwertes und den weiteren Annahmen (vergleiche Kapitel 7) wird angenommen, dass die Verteilungen Gauss 2 und 3 in Abb. 2 passiv sind.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 2 Curve Fitting mit drei Gausskurven der Messdaten der Europabrücke, Messungen der SGK (Abb. 69)

Unter zu Zuhilfenahme von Gleichung 1 zeigt, dass bei einem Potentialwert von über 100 mV CSE das Korrosionsrisiko geringer als 10 % ist. Anhand der berechneten Korrosionswahrscheinlichkeiten kann nach der statistischen Auswertung das Korrosionsrisiko in Abb. 3 (a) dargestellt werden. Rund 55 % der Fläche ist nicht von Korrosion betroffen, hingegen hat 35 % der Fläche ein Korrosionsrisiko von 90 % und mehr.





Abb. 3 Auswertung der Potentialmessdaten Steg Europabrücke (Abb. 69) mit <u>zwei</u> Gaussverteilungen. (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a)

Falls die Methode mit 3 Gaussverteilungen angewendet wird um die Daten der Europabrücke zu interpretieren, zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie in den vorherigen Abschnitten bei der Auswertung für 2 angenommene Verteilungen beschrieben. Durch die zusätzliche Gaussverteilung wurde in diesem Beispiel der Überlappungsbereich der Kurven breiter als bei 2 Gaussverteilungen. Deshalb sind die Schranken für die Zuteilung in die 4 Risikokategorien leicht verschoben. Das Resultat dieser Auswertung ist in Abb. 4 dargestellt, die beiden Kategorien mit sehr hohem oder sehr niedrigem Risiko sind kleiner geworden. Hingegen der Übergangsbereich zwischen den aktiv korrodierenden und passiven Bereichen ist grösser geworden.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 4 (a) Auswertung der Potentialmessdaten Steg Europabrücke (Abb. 69) mit <u>drei</u> Gaussverteilungen. (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a)

Ein Vergleich der Diagramme in Abb. 3 (a) und Abb. 4 (a) deckt sich vor allem im Bereich mit dem Korrosionsrisiko von 90 % und mehr. Zwischen den Bereichen mit dem höchsten Korrosionsrisiko zeichnet sich in einigen Fällen ein Risikogradient zu Bereichen mit dem kleinsten Korrosionsrisiko. Eine Abweichung stellt die folgende Beobachtung dar, welche sich bereits in Abb. 69 leicht angedeutet hat, alle ca. 2 m ausgehend von 1 m als Startpunkt sind schmalere und breitere Streifen mit niedrigerem Potential zu entdecken. Diese Bereiche weisen ein deutlich höheres Korrosionspotential auf.

I.2.2 Vergleich mit Robotermessungen

Die aufgezeichneten Daten des Roboters stammen vom ersten Teil des Steges der Europabrücke (vergleiche Abb. 68). Abb. 5 zeigt das Histogramm mit zwei berechneten Gaussverteilungen aus der halbautomatischen Auswertung. Die eher hohe Breite der Verteilung der passiven Messwerte könnte auf unterschiedlich feuchte Bereiche hinweisen.
692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 5 Histogramm der Messungen am Steg der Europabrücke mit Roboter C2D2 im Messraster 250 x 150 mm mit 2 Gaussverteilungen (siehe Abb. 75)

I.3 Objekte an der Gotthardpassstrasse

I.3.1 Untersicht der Galerie

Die Potentialmessungen an der Untersicht der Galerie an der Gotthardpassstrasse wurden sowohl mit dem Roboter als auch von Hand von der SGK ausgeführt. Somit kann ein Vergleich der halbautomatischen Auswertung durchgeführt werden.

Das Potentialfeld der gesamten Untersicht ist in Abb. 80 dargestellt, der schwarz umrahmet Bereich wurde mit beiden Verfahren gemessen. Abb. 6 zeigt das Histogramm der Messungen von Hand mit zwei Gaussverteilungen, welche die korrodierenden und die passiven Bereiche abgrenzen. Zusätzlich ist die Summenkurve der beiden Wahrscheinlichkeitsdichten in der Grafik gezeigt. Anhand dieser Auswertung wird verdeutlicht, dass diese Art der Auswertung ebenfalls einen Überlappungsbereich ergibt, wie bei der Auswertung nach dem SIA Merkblatt. Jedoch kann mit Gleichung (1) eine Wahrscheinlichkeit für die Potentialfeldmesswerte angegeben werden zu einer der beiden Verteilungen zu gehören. Die Kennwerte der beiden Verteilungen sind der Abbildung zu entnehmen.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 6 Histogramm der manuell aufgenommenen Messdaten im gleichen Bereich wie die Robotermessungen (siehe Abb. 80, schwarz umrahmt) mit zwei (Gotthard an der Untersicht der Galerie)



Abb. 7 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit, gleiche Messdaten wie Abb. 6, Untersicht der Galerie und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte bezogen auf ausgemessene Fläche (Abb. 80)

Abb. 7 zeigt die statistische Auswertung aller Messpunkte an der Galerieuntersicht in 4 Klassen. Der Übergang zwischen den Potentialwerten wird, wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, durch die Unterteilung in Flächen mit hohem Korrosionsrisiko und niedrigem Korrosionsrisiko deutlicher. Rund 65 % der Gesamtfläche hat eine Korrosionswahrscheinlichkeit von 10 % oder weniger. Ein Drittel der Gesamtfläche weist ein sehr hohes Korrosionsrisiko auf. Ein Übergangsbereich mit keiner Zuteilung ist praktisch nicht vorhanden.

Die halbautomatische Auswertung angewendet auf die Roboterdaten sind in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt. Hervorzuheben gilt es, dass der Roboter vorwiegend auf der rechten Seite Messwerte aufgenommen hat. Deshalb ist erwartungsgemäss ein grösserer Teil der Betonoberfläche gemäss der Interpretation von Korrosion betroffen.



Abb. 8 Histogramm der mit dem Roboter aufgenommenen Messdaten im gleichen Bereich wie die manuellen Messungen (siehe Abb. 80, schwarz umrahmt) mit zwei Gaussverteilungen (Gotthard an der Untersicht der Galerie)



Abb. 9 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit, gleiche Messdaten wie Abb. 8, Untersicht der Galerie und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte bezogen auf ausgemessene Fläche (Abb. 80)

I.3.2 Gotthard Galerie Messung im Wandbereich

Die Messdaten im Wandbereich an der Galerie sind in Abb. 10 mit zwei Gaussverteilungen dargestellt. Die Parameter für die aktive Gaussverteilung sind -101.8 mV CSE für den Mittelwert und 24 mV CSE für die Standardabweichung, diejenigen für die passive Verteilung sind -34.6 mV (Mittelwert) und 29 mV CSE (Standardabweichung).



Abb. 10 Histogramm der Potentialmessdaten mit zwei Gaussverteilungen für die passive und den aktiv Bewehrung. Beispiel der Galerie im Wandbereich am Gotthard anhand sämtlicher Messdaten der SGK (Abb. 85)



Abb. 11 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft für den Wandbereich der Galerie und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a) bezogen auf die Fläche mit Messwerten (Abb. 85)

Die Abb. 11 (a) und (b) zeigen die grafische Darstellung der Zuordnung nach Korrosionsrisiko für die aufgenommenen Messdaten. Die Interpretation zeigt auf, dass ein Grossteil der Fläche nicht am korrodieren ist, und die korrodierenden Flächen in zwei Bereiche eingeteilt werden können. Rund zwei Drittel der Fläche zeigt zum Messzeitpunkt gemäss Analyse nach der halbautomatischen Auswertung eine aktive Korrosion der Bewehrung. Für diesen Wandbereich liegen keine verwertbaren Messungen des Inspektionsroboters vor, deswegen wird keine Gegenüberstellung der Resultate durchgeführt.

I.3.3 Galeriewand an der Gotthardpassstrasse

Die Abb. 12 interpretiert die Daten an der Galeriewand mit drei Gaussverteilungen der Messungen durchgeführt durch die SGK in einem Messraster von 250 x 250 mm. Die schwarze Summenkurve der Gaussverteilungen bildet das Histogramm der Messdaten ab. Die Analyse mit der halbautomatischen Auswertung ergab, dass drei Gaussverteilungen vorhanden sind. Die Gaussverteilung (Gauss 3) weist eine grosse Standardabweichung auf, die Auswirkung auf die Zuteilung in die vier Korrosionsrisiko Bereiche ist jedoch gering, weil sich ein Grossteil der Messwerte in den anderen beiden passiven Verteilungen befindet.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 12 Histogramm mit drei Gaussverteilungen für die Galeriewand an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch die SGK im Wandbereich (Abb. 87)

Die Zuordnung nach Korrosionsrisiko in Abb. 13 zeigt, dass sich die Bereiche mit hohem Korrosionsrisiko im unteren Bereich der Mauer im Spritzwasserbereich befinden (siehe Kapitel 6.2.3). Sehr vereinzelt finden sich Messpunkte welche sich einem Korrosionsrisiko von weniger als 50 % zuordnen lassen auch oberhalb des Spritzwasserbereichs, dies könnten aber auch Fehlmessungen sein. Der Übergangsbereich zwischen aktiv und passiv ist sehr klein, weil die erste passive Verteilung steil ansteigt. Die Parameter der Verteilungen sind in Abbildung ersichtlich.

Die Abb. 14 stellt die Zuordnung nach Flächenanteilen in einem Tortendiagramm dar. Die Auswertung zeigt, dass die Widerlagerwand kaum von Korrosion betroffen ist. Nahezu 90 % der Fläche hat ein Korrosionsrisiko kleiner als 10 %. Dennoch sind die 10% korrodierender Bereiche am Wandfuss bei der Interpretation des Zustands oder ev. Instandsetzungsmassnahmen entscheidend wichtig.



Abb. 13 Zuordnung Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionsnach abgestuft 4 die wahrscheinlichkeit in Grössen für Galeriewand an der Gotthardpassstrasse der Daten aufgenommen durch die SGK mit dem gerahmten Ausschnitt, in welchem entsprechende Robotermessungen vorliegen (Abb. 87)

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 14 Zuordnung der Flächenanteile in die vier Stufen des Korrosionsrisikos der Galerie an der Gotthardpassstrasse (Abb. 87)

Dieselbe Auswertung wird im folgenden Abschnitt mit den aufgenommenen Messdaten des Inspektionsroboters durchgeführt. Die Rohdaten sind bereits in Abb. 89 farblich dargestellt; in Abb. 15 ist das Histogramm mit zwei Gaussverteilungen gemäss der der halbautomatischen Auswertung dargestellt.

Die Anwendung der ermittelten Grenzwerte auf die Potentialfelddarstellung ist in Abb. 16 abgebildet (Korrosionsrisikokarte). Ein Vergleich von Abb. 16 und Abb. 17 (gleicher Bereich, Ausschnitt aus Abb. 13) zeigt, dass auch die Messungen mit dem Roboter einen abrupten Übergang von hohem zu niedrigerem Korrosionsrisiko ergeben, die Grenze erscheint jedoch breiter als bei den Handmessungen. Eine Ursache für die Abweichung könnte die Ungenauigkeit bei der Lokalisierung der Robotermessungen sein (siehe Kapitel 4.2.4).

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 15 Histogramm mit zwei Gaussverteilungen für die Galeriewand an der Gotthardpassstrasse aufgenommen durch den Inspektionsroboter (Abb. 89)



Abb. 16 Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft für die Galeriewand an der Gotthardpassstrasse der Daten aufgenommen durch den Inspektionsroboter (Abb. 89)



Abb. 17 Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft für die Galeriewand an der Gotthardpassstrasse der Daten aufgenommen durch die SGK ausgewertet im Ausschnitt

Dieses Beispiel zeigt, dass die halbautomatische Auswertung von Teilbereichen des Potentialfelds (mit deutlich weniger Messdaten) das gleiche Resultat ergibt wie basierend auf dem ganzen Potentialfeld.

I.3.4 Tunnel Costoni di Fieud

Wie erwähnt wurden aufgrund von Traktionsschwierigkeiten im Tunnel kaum Messungen mit dem Roboter aufgezeichnet. Ein ausgiebiger Vergleich mit den Robotermessungen erscheint nicht sinnvoll. Die Messdaten werden trotzdem mit der halbautomatischen Auswertung analysiert.

Portal Nord

In der Potentialfelddarstellung der Messdaten am nördlichen Portal des Tunnels (Abb. 44) zeigt sich in vertikaler Richtung bei ca. 5 m ein deutlicher Sprung bei den Potentialfeldmesswerten. Daher wird der Datensatz der SGK an derjenigen Stelle aufgeteilt in einen linken und rechten Teil. Die halbautomatische Auswertung wird unabhängig auf beide Seiten angewendet. Die Anzahl der Messpunkte pro Datensatz liegt bei ca. 1'500 Einzelmessungen und ist ausreichend für eine aussagekräftige Interpretation.

Die Abbildungen Abb. 18 und Abb. 20 zeigen die Histogramme der Messdaten mit jeweils zwei Gaussverteilungen für die korrodierenden und für die passiven Bereiche der beiden Teilflächen. Die halbautomatische Auswertung bestätigt die Vermutungen aus Kapitel 5 (vergleiche Abb. 19 und Abb. 21). Die Parameter der Verteilungen sind den Abbildungen zu entnehmen.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 18 Histogramm mit zwei Gaussverteilungen für den <u>linken Teil</u> des Potentialfelds von Portal Nord im Costoni di Fieud aufgenommen durch die SGK mit einem Raster von 250 × 250 mm

Die Korrosionsrisikokarte (Abb. 19) zeigt eine ausgeprägte Korrosion der Bewehrung in den Spritzwasserbereichen an beiden Wandfüssen (0-3 bzw. 16 – 19m). Auf einer Seite des Tunnels dehnt sich der korrodierende Bereich bis zum Tunnelfirst aus, wobei einige kleinere nicht korrodierende Bereiche angezeigt werden. Diese Aussage muss mit weiteren Untersuchungen erhärtet werden. Die andere Tunnelseite zeigt insgesamt weniger korrodierende Flächen. Insgesamt besteht eine hohe Korrosions-wahrscheinlichkeit bei 58 % der Fläche, ca. 40 % der Fläche hat ein kleines Korrosionsrisiko. Vereinzelt befinden sich auf zwischen 5 und 10 m auf der Abszissenachse einzelne Messpunkte mit einem hohen Korrosionsrisiko.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 19 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a) bezogen auf die Fläche mit Messwerten für das Portal Nord im Costoni di Fieud linker Teil aufgenommen durch die SGK

Die Auswertung der Potentialfeldmessung am Tunnelportal Nord (rechte Seite) dargestellt in Abb. 20 und Abb. 21 zeigen, dass in diesem Bereich die Flächen in der Nähe zur Fahrbahnoberfläche von Korrosion betroffen sind. Das Histogramm mit den beiden Verteilungen ähnelt einer Spiegelung der linken Seite. Der passive Bereich mit über drei Vierteln der Fläche überwiegt. Aufgrund der Anforderung für eine schmale Standardabweichung für die passive Verteilung hat diese eine ausgeprägte Spitze. Zudem hat sich die korrodierende Verteilung zu positiveren Potentialfeldmesswerten verschieben müssen, um die Daten adäquat abzubilden. Beim rechten Teil am Tunnelportal Nord ist 82 % der Fläche nicht von Korrosion betroffen. Jedoch 17 % der Fläche zeigt ein sehr hohes Risiko für Korrosion.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 20 Histogramm mit zwei Gaussverteilungen für den <u>rechten Teil</u> des Potentialsfelds von Portal Nord im Costoni di Fieud aufgenommen durch die SGK mit einem Raster von 250 × 250 mm



Abb. 21 (a) Zuordnung nach Bereichen mit hoher oder geringer Korrosionswahrscheinlichkeit in 4 Grössen abgestuft und (b) Prozentuale Einteilung der Messwerte von (a) bezogen auf die Fläche mit Messwerten für das Portal Nord im Costoni di Fieud rechter Teil aufgenommen durch die SGK

Die Daten des Potentialfelds Portal Mitte sind als Beispiel (vergleiche Kapitel 7.3.3) analysiert und interpretiert worden. Die Daten des Potentialfelds Portal Süd sind als Beispiel bereits in Kapitel 5.1.2 dargestellt und ausgewertet worden.

I.4 Widerlagerwand in Luterbach

Die Auswertung der Daten des Messroboters an der Widerlagerwand zeigen, wie bereits in vorherigen Kapitel erwähnt eine ausgeprägte Spitze im Histogramm (Abb. 22). Die halbautomatische Auswertung zeigt, dass die Daten mit einer angenommenen Gaussverteilung repräsentiert werden. Ausgehend vom Mittelwert um ca. 0 mV CSE wird eine passive Verteilung angenommen und der Information, dass diese Widerlagerwand vor einigen Jahren saniert worden ist (vergleiche Kapitel 5.1.2).

Sowohl die Auswertung des Rasters von 150 × 150 mm (Abb. 22) und im Raster von 250 × 250 mm (Abb. 23) zeigen, dass die Auswertung mit einer Gaussverteilung nahezu zum selben Ergebnis kommt. Die Messwerte über 250 mV CSE bei feinerem Raster sind im weiteren Raster nicht mehr zu finden. Diese Messpunkte sind mit weiteren Einzelmessungen in der Nähe gewichtet worden und somit zu kleineren Messwerte verschoben worden.



Abb. 22 Histogramm mit einer Gaussverteilungen für die Widerlagerwand in Luterbach aufgenommen durch den Inspektionsroboter C2D2 mit einem Raster von 150 × 150 mm

Auf eine Darstellung nach Korrosionsrisiko wurde verzichtet, da im vorliegenden Fall von einer Gaussverteilung ausgegangen wird, welche dem Potential nach einer positiven Verteilung folgt. Die Analyse der vorliegenden Daten hat bereits mit zwei Gaussverteilungen zu einer Verteilung geführt, welche ca. 7 % der Messdaten. Diese Verteilung hat ein Mittelwert von 25.8 mV CSE bei einer Standardabweichung von 77 mV CSE. Diese Standardabweichung deckt einen Grossteil des Wertebereichs ab und dient lediglich der Minimierung des Fehlers in der Auswertungsroutine und ist somit für die statistische Auswertung nicht relevant.

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken



Abb. 23 Histogramm mit einer Gaussverteilungen für die Widerlagerwand in Luterbach aufgenommen durch den Inspektionsroboter C2D2 mit einem Raster von 250 × 250 mm (Abb. 37)





Wie bereits in Abb. 39 dargestellt lässt sich eine Überlagerung resp. Darstellung des Potentialfeldes mit der Oberfläche darstellen. In einem nächsten Schritt lässt sich ebenfalls das Risiko für Korrosion neben der Betonoberfläche darstellen. Bei der vorliegenden Auswertung ergibt diese Betrachtung der Resultate keine wirklich neuen Erkenntnisse, wurde dennoch der Vollständigkeitshalbe in den Bericht integriert.

Glossar

Begriff	Bedeutung
CSE	Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode
CSE	Copper-copper sulfate electrode
SGK	Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
SGK	La Société Suisse de Protection contre la Corrosion
ASL	Autonomous Systems Lab
ASL	Autonomous Systems Lab
lfB	Institut für Baustoffe
<i>lfB</i>	Institute for Building Materials
C2D2	Climbing Corrosion Detecting Device
C2D2	Climbing Corrosion Detecting Device
GUI	Grafische Benützeroberfläche
GUI	graphical user interface
IBWK IBWK	Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion
ECE	Elektrochemische Chloridentfernung
ECE	Electrochemical chloride removal
RILEM	(Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages)
<i>RILEM</i>	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and
ASTM	International Association for Testing Materials
ASTM	International Association for Testing Materials

Literaturverzeichnis

- [1] R. B. Polder, W. H. A. Peelen, and W. M. G. Courage, "Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures -Technical and non-technical issues," in Materials and Corrosion, 2012, vol. 63, no. 12, pp. 1147–1153.
- [2] B. Elsener, "Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures," Constr. Build. Mater., vol. 15, no. 2–3, pp. 133–139, Mar. 2001.
- [3] Donzel M., Hajdin R, Jacquemoud J., Jeanneret R., Joris, J.-P., "Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen". Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Stassennetze, 2005.
- [4] M. Büchler and Y. Schiegg, "Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten," 2006.
- [5] Raupach, M. "Vorgehensweise bei der Untersuchung von Parkhäusern", DGzfP Fachtagung Bauwerksdiagnose (2006).
- [6] D. Lattanzi and G. Miller, "**Review of Robotic Infrastructure Inspection Systems**," J. Infrastructures Syst., vol. 1, no. 1, pp. 1–16, Sep. 2017.
- [7] D. Schmidt and K. Berns, "Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—A survey of design aspects and technologies," Rob. Auton. Syst., vol. 61, pp. 1288–1305, 2013.
- [8] K. Reichling, M. Raupach, H. Wiggenhauser, G. Dobmann, and J. Kurz, "BETOSCAN – Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks Résumé," 2009.
- [9] S. Dorafshan and M. Maguire, "Automatic Surface Crack Detection in Concrete Structures Using OTSU Thresholding and Morphological Operations," 2016.
- [10] M. Stoppel, A. Taffe, K. Reichling, and J. Kurz, "Zustandsermittlung und Schadensdiagnose für Parkhäuser mit automatisierten zerstörungsfreien Prüfverfahren," Beton- und Stahlbetonbau, vol. 104, no. 10, pp. 691–694, Oct. 2009.
- [11] "Anwenderpreis für Entwicklungsteam von BetoScan.", https://www.dgzfp.de/
- [12] A. Taffe, M. Stoppel, J. H. Kurz, and I. Saarbrücken, "Bestandsaufnahme und Zustandsanalyse von Brücken und Parkhäusern mit automatisierten Verfahren," Fachtagung Bauwerksdiagnose, pp. 1–9, 2017.
- [13] K. Reichling, M. Raupach, H. Wiggenhauser, M. Stoppel, G. Dobmann, and J. Kurz, "BETOSCAN: an instrumented mobile robot system for the diagnosis of reinforced concrete floors," Restor. Build. Monum. an Int. J. Bauinstandsetz. und Baudenkmalpfl. eine Int. Zeitschrift, vol. 15, no. 4, pp. 277–286, 2009.
- [14] N. Gucunski, S.-H. Kee, H. La, B. Basily, A. Maher, and H. Ghasemi, "Implementation of a Fully Autonomous Platform for Assessment of Concrete Bridge Decks RABIT," in Structures Congress 2015, 2015, pp. 367–378.
- [15] N. Gucunski et al., "RABIT: implementation, performance validation and integration with other robotic platforms for improved management of bridge decks," Int. J. Intell. Robot. Appl., vol. 1, no. 3, pp. 271–286, Sep. 2017.
- [16] J. K. Oh et al., "Bridge inspection robot system with machine vision," Autom. Constr., vol. 18, no. 7, pp. 929–941, Nov. 2009.
- [17] K. Berns and C. Hillenbrand, "RoboSense Ein Kletterroboter zur Inspektion von Brücken und Staudämmen," in Informatik aktuell, Autonome Mobile Systeme, Springer Verlag, 2000.
- [18] K. Berns and C. Hillenbrand, "A climbing robot based on under pressure adhesion for the inspection of concrete walls," Proc. ISR, vol. 4, 2004.

- [19] C. Hillenbrand, D. Schmidt, and K. Berns, "CROMSCI: development of a climbing robot with negative pressure adhesion for inspections," Ind. Robot An Int. J., vol. 35, no. 3, pp. 228–237, 2008.
- [20] C. Hillenbrand; D. Schmidt and K. Berns, "Cromsci-A Climbing Robot With Multiple Sucking Chambers for Inspection Tasks," Ind. Robot. Int. J., vol. 35, no. 3, pp. 228–237, 2008.
- [21] M. Jung, D. Schmidt, and K. Berns, "Behavior-based obstacle detection and avoidance system for the omnidirectional climbing robot Cromsci," in 13th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), 2010, pp. 73–80.
- [22] M. Denuder, L. Geissmann, D. Keusch, L. Pfirter, D. Röthlisberger, and P. Ritter, Michael Thoma, "World's First Base Jumping Robot," Zurich, 2011.
- [23] L. Geissmann; M. Denuder; D. Keusch; L. Pfirter and D. Röthlisberger, "PARASWIFT — A Hybrid Climbing And Base Jumping Robot For Entertainment," Proc. CLAWAR 2011 14th Int. Conf. Climbing Walk. Robot. Support Technol. Mob. Mach., no. september, pp. 393–402, 2011.
- [24] M. Denuder, "Development of a Paraglide-Deployment System for a Base Jumping Robot," ETH Zurich, 2011.
- [25] L. Pfirter, "Climbing and Falling Robot: Image Capturing, Transmission and **Processing**," ETH Zürich, 2011.
- [26] J. D. Foley, M. A. Fischler, and R. C. Bolles, "Graphics and Image Processing Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Apphcations to Image Analysis and Automated Cartography."
- [27] "Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop.", https://www.qt.io/.
- [28] J. Hunhevicz, "Implementation of an Acoustic Delamination Sensor on a Climbing Robot," Zurich, 2014.
- [29] J. Zhu and J. S. Popovics, "Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo," J. Eng. Mech., vol. 133, no. 6, pp. 628–640, Jun. 2007.
- [30] "EP 2 476 724 A1 EUROPEAN PATENT APPLICATION," *Bulletin*, vol. 231043, no. 212, 2012.
- [31] R. Knuser and R. Vonäsch, "Modellprobekörper für Potentialmessungen -Herstellung und Simulation," Zurich, 2013.
- [32] B. Elsener, M. Molina, and H. Böhni, "Elektrochemische Chloridentfernung an Stahlbetonbauwerken," 1992.
- [33] Schweizerische Gesellschaft für Korrosion, "Grundlagen der Korrosion und der Potentialfeldmessung bei Stahlbetonbauten," Zürich, 1994.
- [34] Raupach, M. "Half-cell potential measurements-Potential mapping on reinforced concrete structures."Mater. Struct. / Matériaux Constr., vol. 36, pp. 461-471.
- [35] ASTM International, West Conshohocken,"ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", PA, 2015, https://doi.org/10.1520/C0876-15
- [36] Schweizerischer Ingenieur-und Architekten-Verein, "Planung, Durchführung und Interpretation der Potenzialmessung an Stahlbetonbauten," Merkblatt 2006, SIA, pp. 1–40, 2013.
- [37] B. Elsener and H. Böhni, "Electrochemical Methods for the Inspection of Reinforcement Corrosion in Concrete Structures - Field Experience," Mater. Sci. Forum, vol. 111–112, pp. 635–646, 1992.
- [38] J. Gulikers and B. Elsener, "Development of a calculation procedure for the statistical interpretation of the results of potential mapping performed on

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

reinforced concrete structures," Mater. Corros., vol. 60, no. 2, pp. 87–92, Feb. 2009.

- [39] ETH Spark Award 2013. https://www.ethz.ch/de/wirtschaftgesellschaft/techoffer/spark-award/2013.html.
- [40] Elsener B, Angst U, Leibbrandt A, Glauser O, Flatt RJ, Caprari G, Siegwart R., "Climbing Robot for Corrosion Inspection and Monitoring of Reinforced and Post-tensioned Concrete Structures". In: Concrete Innovation Conference 2014 (CIC2014), Oslo, Norway, June, 2014.
- [41] Flying corrosion inspection robot for infrastructures 2017. http://www.ifb.ethz.ch/durability/research/ongoing-projects/flying-corrosioninspection-robot-for-infrastructures.html

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Formular Nr. 3: Projektabschluss

Version vom 09.10.2013

erstellt / geändert am:	16. Juli 2018	

Grunddaten

Projekt-Nr.:	AGB 2012/011_OBF		
Projekttitel:	Potentialmessroboter für die Bauwerksinspektion - Automatisierte Erfassung des Korrosionszustands von Stahlbetontragwerken		
Enddatum:	31. Juli 2018		

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Die Potentialfeldmesstechnik erlaubt die zerstörungsfreie Detektion der (chloridinduzierten) Bewehrungskorrosion von der Betonoberfläche aus. Die Korrosion der Bewehrung, Hauptursache für Schäden an Stahlbetonbauten, kann so frühzeitig und lang vor einer visuellen Inspektion entdeckt werden. Viele wichtige Bauteile (Stützen, Untersichten etc.) sind jedoch nur schwer zugänglich. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Prototyp eines vortex basierten, kletternden Roboters eingesetzt, um die Möglichkeiten und Grenzen auszuloten. Es zeigte sich, dass reale Betonoberflächen (verschmutzt, mit Schalungsunebenheiten, Hindernissen) den Einsatz des Roboters stark limitierten bzw. verunmöglichten. Die Technologie des eingesetzten Roboters wurde durch die rasche Entwicklung im Bereich der fliegenden Drohnen überholt.

Die erhaltenen Messdaten der heute sehr häufig eingesetzten Potentialfeldmesstechnik müssen vom Ingenieur oder beauftragten Fachpersonen zunächst ausgewertet werden (siehe Merkblatt SIA 2006 (2013)). Diese Auswertung ist heute zeitraubend und nicht vollständig mathematisch gesichert. Wenn - wie beim Einsatz von Robotern zu erwarten - sehr viel mehr Potentialfelder ausgewertet werden müssen könnte dieser Schritt zum Flaschenhals der Methode werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde daher ein Algorithmus, welcher eine rasche, objektive und personen- unabhängige Auswertung erlaubt, entwickelt und an zahlreichen Beispielen getestet. Das Resultat ist eine Karte des Bauteils mit den Wahr- scheinlichkeiten für das Auftreten der Bewehrungskorrosion. Mit dem Einsatz dieser halb- automatischen Auswertung kann sich der verantwortliche Ingenieur auf den wesentlichen Teilschritt der Methode, die Interpretation der Potentialmessdaten, konzentrieren und die Zusammenhänge zu Betonqualität, Betonüberdeckung und Exposition erarbeiten.

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 1/3

9

Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Ziel des Forschungsauftrages war einerseits den Einsatz des C2D2 Roboters an Bauwerken in der Praxis zu testen um so die Möglichkeiten und Grenzen zu eruieren. Es zeigte sich, dass grössere Risse, Schalungsunebenheiten und vor allem Leitungen Hindernisse für den Roboter darstellten. Die Vortex Plattform ist technologisch überholt und wird in Zukunft durch Drohnen ersetzt.

Das zweite Ziel, die halbautomatische Auswertung der Potentialfeldmessdaten wurde erreicht. Damit steht ein auf der statistischen Verteilung der Messdaten beruhender Algorithmus zur Verfügung, der die Auswertung rascher und personenunabhängig ausführt. Der beauftragte Ingenieur kann sich auf die Zusammenhänge zu Chloridgehalt, Betonüberdeckung oder Betonqualität, d.h. auf die Auswertung konzentrieren.

Folgerungen und Empfehlungen:

Der Einsatz von Robotern bzw. fliegenden Drohnen für die Zustandserfassung an Bauwerken wird weiterhin ein Forschungsthema bleiben. Eine zukünftige Anwendung ermöglicht auch sonst unzugängliche Bauwerksteile zu erfassen und die Qualtiät der Daten der Zustandserfassung zu steigern.

Der entwickelte Algorithmus zur halbautomatischen Auswertung der Potentialfeldmessungen erlaubt unabhängig von der Art der Erfassung eine raschere, objektivere und mathematisch begründete Auswertung der Messdaten und liefert eine Karte der Korrosionswahrscheinlichkeit. Diese neue Art der Auswertung erlaubt dem beauftragten Ingenieur eine Konzentration auf die bauwerksbezogene Interpretation der Daten. Anlässlich der Kurse für die Personen-Zertifizierung "Fachperson Potentialmessung" soll diese Auswertungsart geschult werden.

Publikationen:

1) A. Leibbrandt, G. Caprari, U. Angst, R. Y. Siegwart, R. J. Flatt and B. Elsener, Climbing Robot for Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures, Proc. 2nd Int. Conf. on Applied Robotics in the Power Industry (CARPI) 2012, ETH Zurich 11.-13. September 2012 2) B. Elsener, R. Flatt, A robot for heights, INTERNATIONAL INNOVATION, 5 (2013) 118-120

3) B. Elsener, A. Leibbrandt, O. Glauser, U. Angst, R.J. Flatt, G. Caprari, Y. Siegwart, Climbing robot for corrosion inspection and monitoring of reinforced and post-tensioned concrete structures, Concrete Innovation Conference CIC 2014, paper 74

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Elsener

Vorname: Bernhard

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, Institut für Baustoffe

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

692 | Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion – Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Projekt war von Beginn an der Schnittstelle zwischen Forschung und Entwicklung. Der damals innovative, vortex basierte Roboter wurde durch personell bedingte Verzögerungen und die rasche technologische Entwicklung der Drohnen obsolet. Die Grenzen des Einsatzes dieser Roboter wurden aufgezeigt.

Die Resultate der Forschung im Bereich der Auswertung von Potentialfeldmessdaten mit einem raschen, objektiven und mathematisch fundierten Algorithmus sind universell, d.h. unabhängig von der Art der Datenerfassung (manuell, Radelektrode etc.) verwendbar. Dies ist denn auch das positive Hauptresultat der Forschungsarbeit.

Umsetzung:

Der Einsatz des Vortex Roboters wurde durch die technologische Entwicklung (Drohnen) überholt. Die Resultate in Bezug auf Hindernisse beim Einsatz von Robotern können in zukünftige Projekte einfliessen.

Der Algorithmus für die halbautomatische Auswertung der Potentialfeldmessdaten soll bei den Kursen zur Personenzertifizierung "Fachperson Potentialmessung" in die Schulung einfliessen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der Einsatz von Robotern oder Drohnen bei der Zustandserfassung von Stahlbetontragwerken bleibt weiterhin ein aktuelles Forschungsthema.

Einfluss auf Normenwerk:

Es ist zu prüfen, ob die halbautomatische Auswertung der Potentialfeldmessungen bei der nächsten Revision in die Richtlinie SIA 2006 aufgenommen werden soll.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Käser

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Baudirektion Kanton Zürich, Tiefbauamt

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3/3

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Forschung im Strassenwesen \rightarrow Downloads \rightarrow Formulare) heruntergeladen werden.