



Bachelorarbeit

**Entwicklung von Messtechnik zur Bestimmung der  
Betondeckung, des elektrolytischen  
Betonwiderstandes und des Potentialfeldes mittels  
einer autonomen Messplattform**

Tim Sahre

Fachbereich 2

Umweltinformatik

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing Jochen Wittmann

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Dipl.-Volksw. Christoph Strangfeld

Datum: 28.09.2017

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Arbeit mit Hilfe eines Plagiatserkennungsdienstes auf enthaltene Plagiate überprüft wird.

---

(Ort, Datum)

---

(Unterschrift)

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	V
Zusammenfassung .....	VI
1. Motivation .....	1
1.1 Zielsetzung der Forschung .....	2
2. Grundlagen .....	4
2.1 Vorbetrachtung: Korrosion im Bewehrungsstahl .....	4
2.2 Datenerfassung .....	7
2.3 Betondeckung .....	8
2.4 Elektrolytischer Betonwiderstand .....	10
2.5 Potentialfeldmessung .....	12
2.5.1 Prinzip der Potentialfeldmessung .....	13
2.5.2 Prinzip der Differenzpotentialfeldmessung .....	15
3. Realisierung der Messsysteme .....	19
3.1 Verwendete Datenerfassungskomponenten .....	19
3.1.1 LabVIEW .....	19
3.1.2 NI USB- 6210 .....	21
3.1.3 NI- DAQmx .....	22
3.2 Hilfssysteme .....	23
3.2.1 Wegstreckenerfassung .....	23
3.2.2 Relative Luftfeuchtemessung .....	26
3.3 Betonüberdeckung .....	28
3.4 Differenzpotentialfeldmessung .....	31
4 Evaluation und Ergebnisse .....	38
5. Fazit .....	45
Literaturverzeichnis .....	IX

## **Abkürzungsverzeichnis**

ZFP	<b>Z</b> erstörung <b>f</b> reie <b>P</b> rüfung
BAM	<b>B</b> undes <b>a</b> nstalt für <b>M</b> aterialforschung und -prüfung
ASTM	<b>A</b> merican <b>S</b> ociety for <b>T</b> esting and <b>M</b> aterials
LabVIEW	<b>L</b> ab <b>o</b> rat <b>o</b> ry <b>V</b> irt <b>u</b> al <b>I</b> nstr <b>u</b> mentation <b>E</b> ngineering <b>W</b> ork <b>b</b> ench
NI	<b>N</b> ational <b>I</b> nstr <b>u</b> ments
VI	<b>V</b> irt <b>u</b> al <b>I</b> nstr <b>u</b> ment
DAQ	<b>D</b> ata <b>A</b> c <b>q</b> uis <b>i</b> tion
NI MAX	<b>N</b> ational <b>I</b> nstr <b>u</b> ments <b>M</b> eas <b>u</b> rement & <b>A</b> utomat <b>i</b> on <b>E</b> Xpl <b>o</b> rer
PFI	<b>P</b> rogram <b>m</b> able <b>F</b> unct <b>i</b> on <b>I</b> ntr <b>o</b> face
USBTMC	<b>U</b> S <b>B</b> <b>T</b> est & <b>M</b> eas <b>u</b> rement <b>C</b> lass
VISA	<b>V</b> irt <b>u</b> al <b>I</b> nstr <b>u</b> ment <b>S</b> oft <b>w</b> are <b>A</b> rchit <b>e</b> cture
GPIB	<b>G</b> ener <b>a</b> l <b>P</b> ur <b>p</b> ose <b>I</b> ntr <b>o</b> face <b>B</b> us
EPROM	<b>E</b> ras <b>a</b> ble <b>P</b> rogram <b>m</b> able <b>R</b> e <b>a</b> d- <b>O</b> nly <b>M</b> emory
RSE	<b>R</b> efer <b>e</b> nced <b>S</b> ing <b>l</b> e- <b>E</b> nd <b>e</b> d <b>M</b> ode

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Redoxreaktionen am Bewehrungsstahl .....	5
Abbildung 2: Ausbildung von Potentialdifferenz im Bewehrungsstahl.....	6
Abbildung 3: Einfluss der Betondeckung auf Potentialfeldmessung.....	8
Abbildung 4: Messmethode des Wirbelstrom- Verfahrens .....	9
Abbildung 5: Beziehung zwischen Potential, Potentialtrichter und Potentialgradient .....	16
Abbildung 6: Delta- Sonde der IBAC (Stoppel, 2011) .....	17
Abbildung 7: Vierradelektrode mit Delta- Sonden Setup .....	17
Abbildung 8: Verfügbare Kanäle des NI USB- 6210 (NI, 2014).....	21
Abbildung 9: Vierradelektrode mit magnetischem Inkrementaldrehgeber .....	23
Abbildung 10: Anschlüsse der Wegstreckenerfassung .....	24
Abbildung 11: Blockdiagramm der Wegstreckenerfassung.....	25
Abbildung 12: HIH- 5030 Feuchtigkeitssensor (sensing.honeywell.com, 2017) .....	26
Abbildung 13: Anschlüsse für die Messung der relativen Luftfeuchte.....	26
Abbildung 14: Blockdiagramm zur Messung der relativen Luftfeuchte.....	27
Abbildung 15: Profoscope.....	28
Abbildung 16: Grundlegender Aufbau einer VISA Anwendung.....	29
Abbildung 17: Front Panel der Betondeckungsmessung .....	30
Abbildung 18: Vierradelektrode.....	31
Abbildung 19:Canin+ Anzeigegerät - seitliche Anschlüsse.....	31
Abbildung 20: Canin+ Anzeigegerät - Front.....	31
Abbildung 21: Anschlüsse der Vierradelektrode .....	33
Abbildung 22: Taskkonfigurierung mittels des Measurement & Automation Explorers .....	34
Abbildung 23: Verkabelung des DAQ im RSE- Modus .....	36
Abbildung 24: DAQ Kanalbelegung im RSE- und DIFF- Modus.....	36
Abbildung 25: Verkabelung des DAQ im DIFF- Mode .....	36
Abbildung 26: Potentiostat und Probekörper .....	38
Abbildung 27: Zwecks Vorwässerung abgedeckter Probekörper .....	38
Abbildung 28: Geöffnete Radelektrode .....	39
Abbildung 29: Aufbau für den zweiten Testlauf.....	42
Abbildung 30: Aufbau für den ersten Testlauf.....	42
Abbildung 31: Probekörper mit Markierungen für Messspuren .....	42

## **Zusammenfassung**

Das Ziel des Bachelorprojektes war die Entwicklung eines automatisierten, zerstörungsfreien Messsystems zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosionen. Ein etabliertes Verfahren zur Detektion von Korrosionswahrscheinlichkeiten ist das quasi- zerstörungsfreie Verfahren der Potentialfeldmessung. Als bislang wenig erforschte, vollkommen zerstörungsfreie Variante der Potentialfeldmessung, steht im Fokus dieser Arbeit die Differenzpotentialfeldmessung. Bei der Differenzpotentialfeldmessung handelt es sich um einen probabilistischen Ansatz, dessen Aussagekraft durch Kombination verschiedener Messsysteme erhöht werden kann. Als wichtige Parameter hinsichtlich der Interpretation von Differenzpotentialfeldmessungen wurden daher weiterhin Systeme zur Erfassung des elektrolytischen Betonwiderstandes und der Betonüberdeckung in die Arbeit mit aufgenommen. Die einzelnen Komponenten des zu entwickelnden Kombi- Messsystems wurden hinsichtlich ihrer Montierbarkeit auf einer autonom agierenden Messplattform, dem BetoScan Light, ausgewählt.

## **1. Motivation**

Beton ist ein vergleichsweise günstiger und vielseitig einsetzbarer Baustoff, welcher sich durch seine Druckfestigkeit auszeichnet. In der Praxis wird beim Bau häufig ein Verbundstoff aus Beton und Stahl (Bewährungsstahl) verwendet, um zusätzlich die Zugfestigkeit von Betonkonstruktionen zu erhöhen. Die am häufigsten auftretenden Schäden an Stahlbetonkonstruktionen sind durch Korrosionen der Stahlbewehrung bedingt. Bewehrungsstahlkorrosion stellt hierbei nicht nur ein zentrales sicherheitstechnisches Risiko dar. Finanzielle Aufwendungen für Maßnahmen der Bauwerkserhaltung übersteigen bereits die für Neubauwerke. Weltweit werden allein die Kosten für Gebäudesanierungen auf über 20 Mrd. € pro Jahr geschätzt (BundDZ 1997[1])

Da sich die Korrosionsprozesse innerhalb des Betons abspielen, werden Korrosionen häufig erst aufgrund von an der Oberfläche auftretenden Folgeschäden bemerkt. Um diese zu vermeiden, ist eine frühzeitige Detektion von Korrosionen wünschenswert. Konventionelle Untersuchungsmethoden wie visuelle Kontrollen oder das Abklopfen führen häufig nicht zu einer ausreichenden Beurteilung der Bauwerkszustände. Eine Möglichkeit ist die stichprobenartige Öffnung von Kontrollstellen. Diese ermöglicht allerdings nur punktuelle Auskunft über den Zustand eines Bauwerkes und ist zudem mit hohen Kosten verbunden, da die Kontrollstellen wiederhergestellt werden müssen.

Daher bieten sich zerstörungsfreie Prüfverfahren an. Bei manueller Durchführung entsteht allerdings auch hier, insbesondere bei größeren Prüfflächen, ein hoher Kosten-, Zeit- und Personalaufwand.

Die Automatisierung zerstörungsfreier Prüfverfahren ermöglicht schnelle Messungen großer Prüfflächen wie Parkdecks oder Brücken. Zudem führt die Kombination mehrerer Messverfahren mit positionsgenauer Datenerfassung mehrerer Sensoren mit hoher Messpunktdichte zu einer verbesserten Aussagekraft im Vergleich zu punktweisen manuellen Messungen.

## 1.1 Zielsetzung der Forschung

Der limitierende Faktor hinsichtlich der Haltbarkeit von Stahlbetonbauwerken ist der Zustand seiner Bewehrung. Da die Bewehrung von Beton ummantelt ist, gehören Aussagen über dessen Zustand jedoch auch zu einer der schwierigsten Aufgaben bei der Zustandsbewertung von Stahlbetonkonstruktionen. Die bei weiten am häufigsten auftretende Schadensursache bei Bewehrungsstahl stellt die Bewehrungskorrosion dar. Wenn die Folgeschäden von Bewehrungsstahlkorrosion erst an der Betonoberfläche zutage treten, verbleibt als letzte Option meist nur noch eine zeit- und kostenintensive Vollsanieung des Bauwerks. Eine rechtzeitige Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion ermöglicht hingegen die Planung von zielgerichteten lokalen Instandsetzungsmaßnahmen.

Ein etabliertes Instrument zur Bewertung von Korrosionswahrscheinlichkeiten in Stahlbetonbauwerken ist das elektrochemische Verfahren der Potentialfeldmessung. Durch Potentialfeldmessungen lassen sich direkt vor Ort Aussagen über mögliche Korrosionen innerhalb von Stahlbetonkonstruktionen treffen, ohne diese öffnen zu müssen. Allerdings handelt es sich bei der Potentialfeldmessung um ein rein qualitatives Messverfahren. Die Auswertung von Potentialfeldmessungen ist von vielen Umgebungsfaktoren wie dem Chlorid- und Sauerstoffgehalt im Beton, der Bauteilfeuchte, der Umgebungstemperatur, der Betonüberdeckung oder des elektrolytischen Betonwiderstandes abhängig. Eine Interpretation von Potentialfeldmessungen ist daher komplex. Um Bewehrungsstahlkorrosion im Beton sicher detektieren zu können, müssen daher alle verfügbaren Informationen aus direkten sowie indirekten Messverfahren genutzt werden.

Viele der genannten Einflussfaktoren sind eng miteinander gekoppelt. Als die wichtigsten Parameter hinsichtlich der Interpretation von Potentialfeldmessungen haben sich hierbei die Dicke der Betonüberdeckung sowie der elektrolytische Betonwiderstand erwiesen. Ziel der Arbeit soll die Entwicklung eines Messsystems zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion mittels eines Potentialfeldmessverfahrens sein. Dieses System soll weiterhin die Betonüberdeckung sowie den elektrolytischen Betonwiderstand als wichtige Parameter hinsichtlich der Interpretation von Potentialfeldmessungen erfassen.

Ein Kriterium bei der Auswahl der verwendeten Messinstrumente besteht darin, diese später auf einer mobilen Messplattform montieren zu können. Bei der Messplattform handelt es sich um den bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) entwickelten BetoScan Light (Hauke, 2016 [2]). Das hat zur Folge, dass die auszuwählenden

Messkomponenten in ihrer Größe und hinsichtlich ihrer Spannungsversorgung bestimmten Spezifikationen genügen müssen. Die Komponenten müssen darüber hinaus während der Fahrt autonom Messungen vornehmen können. Dies erfordert eine gute Automatisierbarkeit der einzelnen Komponenten. Hinsichtlich besserer Wartung, ist wünschenswert sämtliche Komponenten programmatisch zu einem Gesamtsystem zusammenfassen zu können.

Darüber hinaus soll das entwickelte Kombi- Messsystem vollkommen zerstörungsfrei und autonom agieren. Da das Potentialfeldmessverfahren zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosionen auf einen Bewehrungsanschluss angewiesen ist, handelt es sich bei dem Verfahren nur um eine quasi- zerstörungsfreie Messmethode. Ein alternativer, vollkommen zerstörungsfreier Ansatz zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, stellt die Differenzpotentialfeldmessung dar. Beide Verfahren beruhen auf demselben Messprinzip. Allerdings liegt der Differenzpotentialfeldmessung eine andere Messmethodik zugrunde. Dadurch können Korrosionen mittels Differenzpotentialfeldmessung auch ohne Bewehrungsanschluss detektiert werden. Da beide Messungen auf demselben Prinzip beruhen, kann die Differenzpotentialfeldmessung auch mit demselben Messgerät wie die Potentialfeldmessung durchgeführt werden. Ohne limitierenden Bewehrungsanschluss könnte eine automatisierte Messplattform wesentlich größere Prüfflächen abdecken. Trotzdem ist dieser Ansatz für die automatisierte Prüfung bisher nur wenig erforscht worden. Ein Großteil der theoretischen Grundlagen zur automatisierten Differenzpotentialfeldmessung, finden sich in der Dissertationsarbeit von Markus Stoppel (Stoppel, 2011 [3]). Ebenfalls zu nennen ist ein auf der Differenzpotentialfeldmessung beruhender Ansatz des Instituts für Bauforschung in Aachen (Reichling, 2011 [4]). Bei der Realisierung der vollkommen zerstörungsfreien Prüfung von Bewehrungsstahlkorrosion mittels Differenzpotentialfeldmessung, wurden die Erkenntnisse aus diesen beiden Arbeiten kombiniert.

## 2. Grundlagen

Bevor im Kapitel 3 näher auf die entwickelten Messsysteme eingegangen wird, folgen in diesem Kapitel noch einige für das Verständnis nötige Grundlagen. Es wird zunächst auf die physikalisch- chemischen Prozesse aktiver Korrosionen eingegangen. Darauf folgt eine kurze Einführung in den grundsätzlichen Aufbau und die Gestaltung von Datenerfassungssystemen. Schließlich werden dann die theoretischen Grundlagen behandelt auf denen die angewandten Messsysteme basieren.

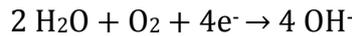
### 2.1 Vorbetrachtung: Korrosion im Bewehrungsstahl

Korrosionen am Bewehrungsstahl entstehen durch Redoxreaktionen, also der Oxidation von Eisen durch Abgabe von Elektronen und der Reduktion von Sauerstoffes durch Aufnahme dieser Elektronen.

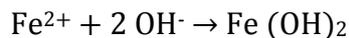
In trockener Umgebung verbindet sich atmosphärischer Sauerstoff ( $O_2$ ) im Beton mit dem Eisen des Bewehrungsstahls zu einer feinen Schicht Eisenoxid. Diese feine Schutzschicht (Passivierungsschicht), welche den Bewehrungsstahl umgibt, verhindert weitere Reaktionen mit dem Sauerstoff. Dadurch ist der Bewehrungsstahl im alkalischen Milieu ( $> 13$  pH) des Betons vor Korrosion geschützt. Unter Einwirkung von atmosphärischen Kohlendioxid ( $CO_2$ ), welcher in den Beton diffundiert, kann der pH- Wert des Betons jedoch soweit abnehmen, dass sich die Passivierungsschicht auflöst (Karbonatisierung des Betons). Der Karbonatisierung des Betons kann durch eine größere Betondeckung und einer entsprechenden Zusammensetzung des Betons (höherer pH- Wert) entgegengewirkt werden.

Die Passivierungsschicht der Bewehrung kann weiterhin ab einer bestimmten Konzentration an Chloriden (z.B. durch Tausalzeinträge in Parkhäusern oder durch Salzwasser an Küstennahen Bauwerken) versagen. Die Höhe des hierfür nötigen Chloridgehalts hängt von verschiedenen Parametern wie dem Wassergehalt im Beton oder dem Betonwiderstand ab (Vgl. Fluge, 2001 [5])

Hat sich die Passivierungsschicht des Bewehrungsstahls zersetzt (*Depassivierung* des Bewehrungsstahl), können nun bei Vorhandensein von Wasser und Sauerstoff Oxidations- und Reduktionsprozesse einsetzen. Hierbei reagieren Wassermoleküle mit vom Eisen abgegebenen Elektronen zu negativ geladenen Hydroxidionen, welche sich in der Porenflüssigkeit des umgebenen Betons anreichern:



Bei dem Bewehrungsstahl handelt es sich um ein positiv geladenes Gitter von Atomen, in dem sich negativ geladene Elektronen frei bewegen können. Um den Elektronenmangel durch Abgabe von Elektronen an das Wasser auszugleichen, strömen [?] nun Elektronen im Metall nach. Dies führt zu einem Elektronenmangel an anderer Stelle innerhalb des Bewehrungsstahls. Hier lösen sich nun positiv geladenen Eisenionen ( $\text{Fe}^+$ ) aus dem Bewehrungsstahl und reagieren Aufgrund ihrer unterschiedlichen Ladungszustände mit den Hydroxidionen zu Eisen(II)-hydroxidoxid:



Durch weitere Reaktionen mit Hydroxidionen, Sauerstoff und Wassermolekülen entsteht schließlich Eisen(III)-hydroxidoxid, welches sich auf der Eisenoberfläche absetzt:

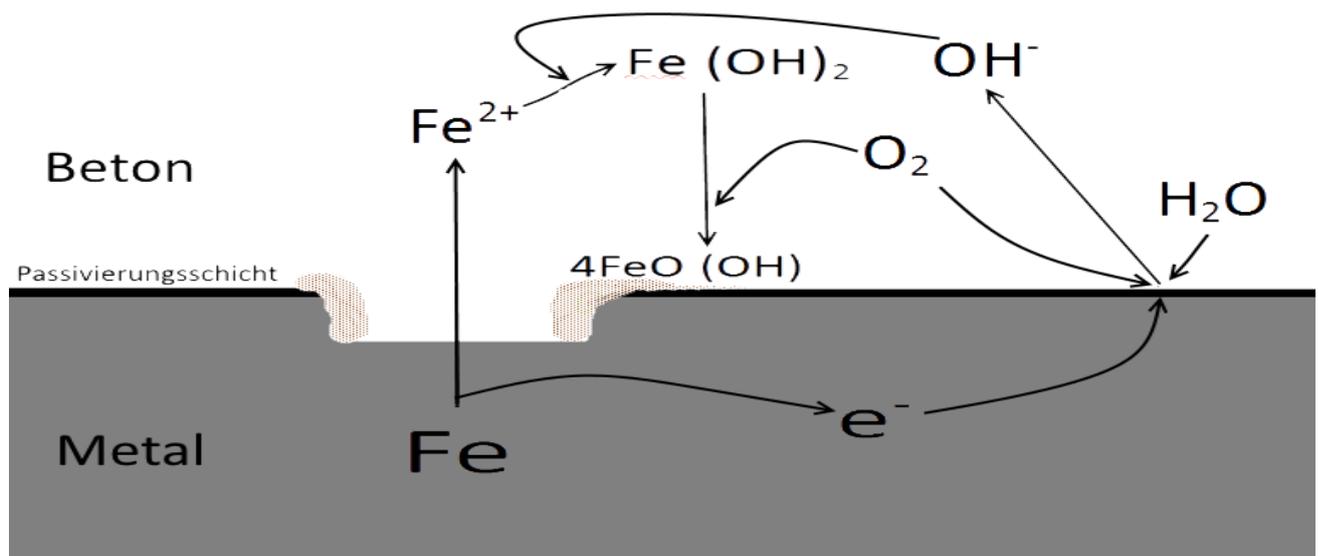
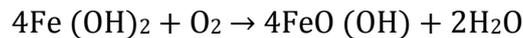


Abbildung 1: Redoxreaktionen am Bewehrungsstahl

Der Korrosionsprozess wird hierbei durch Salze wie Natriumchlorid im Wasser nicht nur durch Depassivierung ermöglicht, sondern auch beschleunigt. Die Salzionen führen zu einem Ladungsausgleich an den Reaktionsorten – also an Kathode und Anode. Dies führt zu der Ausbildung von Hydroxidionen (durch  $\text{Na}^+$  Kationen) und der zusätzlichen Freisetzung von Eisenatome (durch  $\text{Cl}^-$  Anionen).

Zwischen den beiden Teilprozessen der Redoxreaktion (Oxidationsprozesse an depassivierten- und Reduktionsprozesse an passivierten Bereichen des Bewehrungsstahls) entsteht eine

Potentialdifferenz innerhalb des Bewehrungsstahls. Es bilden sich eine Anode und eine Kathode aus:

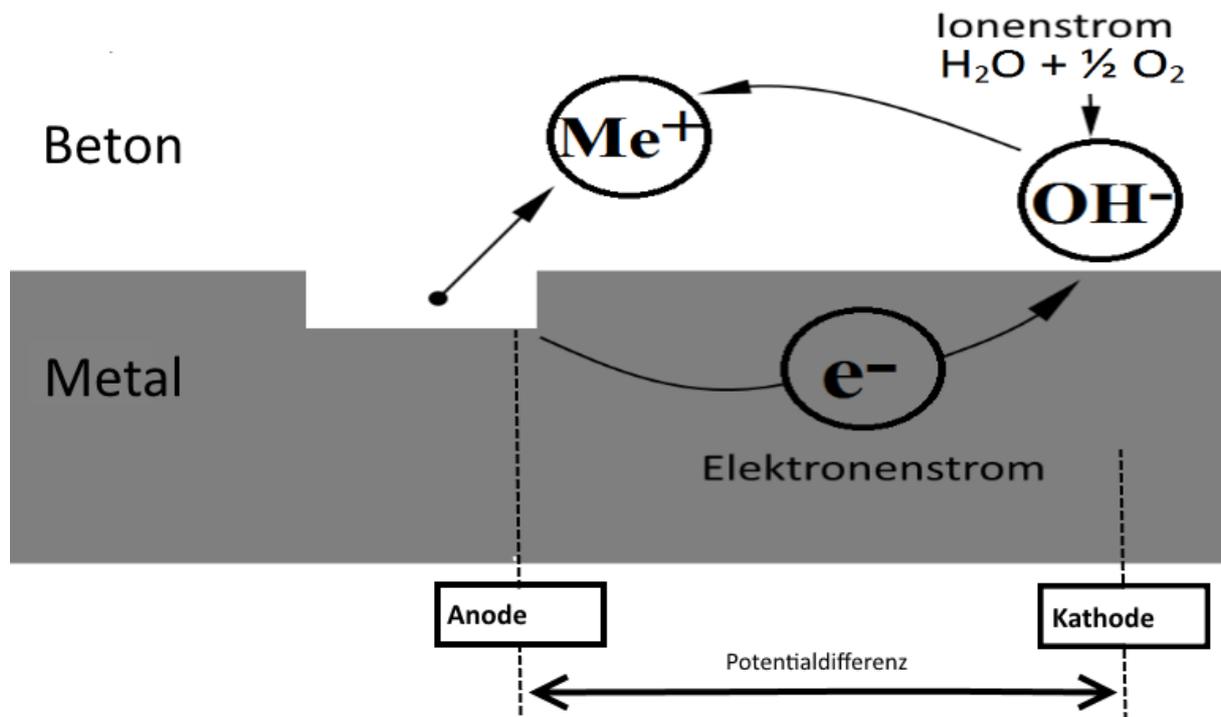
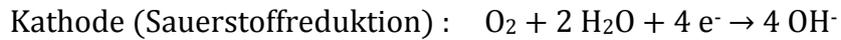


Abbildung 2: Ausbildung von Potentialdifferenz im Bewehrungsstahl

Zwischen Anode und Kathode bilden sich Äquipotentiallinien bis zur Betonoberfläche aus. Die Potentialdifferenz zwischen anodischen Bereichen des Bewehrungsstahls, welche einen Elektronenüberschuss aufweisen und damit negativer geladen sind als kathodische Bereiche, können an der Betonoberfläche als elektrochemische Potentialdifferenzen gemessen werden (Siehe Abschnitt 2.5.1).

## 2.2 Datenerfassung

Datenerfassung ist der Vorgang, bei dem reale physikalische Größen wie Spannung, Temperatur oder Druck von Sensoren erfasst und in digitale Signale umgewandelt werden. Die digitalen Signale können später im Computer weiterverarbeitet werden. Der grundlegende Aufbau eines computergestützten Datenerfassungssystems umfasst typischerweise einen Sensor, ein Datenerfassungsgerät sowie einen Computer. Der Sensor misst natürliche Phänomene und wandelt diese in messbare elektrische Signale um. Je nach Sensortyp werden hierbei verschiedene Größen wie Spannung, Strom oder Widerstand gemessen und in zeitlichen Bezug gesetzt. Datenerfassungsgeräte wie Analog/ Digital- Wandler (A/D- Wandler) bilden die Schnittstelle zwischen Sensor und Computer. Datenerfassungsgeräte wandeln vom Sensor übertragende Analogsignale in bestimmten zeitlichen Abständen in Digitalsignale um und übertragen diese dann an den Computer. Auf dem Computer können die Messdaten schließlich über Programme sinnvoll dargestellt, weiterverarbeitet und gespeichert werden. Gleichzeitig steuert der Computer über Treiber das Datenerfassungsgerät. Treiber erleichtern die Kommunikation mit dem Datenerfassungsgerät und fungieren als Programmierschnittstellen zwischen Datenerfassung und Anwendungssoftware. Die Anwendungssoftware wird zu dem Zweck entwickelt, die Interaktion zwischen Anwender und Messsystem möglichst einfach und intuitiv zu gestalten (Vgl. NI, 2017a [6]). Auf die verwendeten Komponenten des in dieser Arbeit entwickelten Messsystem wird im Unterkapitel 3.1 näher eingegangen.

## 2.3 Betondeckung

Die Betondeckung ist ein Maß für den Abstand zwischen der Außenkante des Bewehrungsstahls und der Betonoberfläche. Sie schützt den Bewehrungsstahl vor chemischen und physikalischen Umwelteinflüssen. Eine ausreichend große Betondeckung verhindert, dass der Bewehrungsstahl Sauerstoff und Wasser ausgesetzt wird und somit vor Korrosion geschützt ist. Daher stellt eine angemessene Betondeckung eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Beständigkeit von Stahlbetonbauwerken dar. Die Bestimmung der Betondeckung gehört zu den routinemäßigen durchgeführten Messungen zur Qualitätssicherung und Zustandsbewertung von Stahlbetonbauwerken. In der Praxis sind Betondeckungen zwischen 20 bis 50 mm üblich. Die Mindestbetondeckung hängt maßgeblich von den zu erwartenden Umwelteinflüssen am jeweiligen Standort ab und wird in der DIN 1045, welche sich mit der Bemessung von Stahlbetonbauten befasst, geregelt (Vgl. Institut für Stahlbetonbewehrung e.V. , 2010 [7]).

Neben dem direkten Schutz vor Umwelteinflüssen dient die Betondeckung jedoch auch als wichtiger Parameter hinsichtlich der Interpretation von Potentialfeldmessungen. Generell lässt die Wahrscheinlichkeit korrosionsaktive Bereiche im Bewehrungsstahl zu detektieren in dem Maße nach, in dem die Betondeckung zu- und die Anodengröße abnimmt (Vgl. Büchler, 2007 [8]). Da die an der Betonoberfläche gemessenen Potentialtrichter (Siehe Abschnitt 2.5.2) kleiner werden und somit durch zu grob gewählte Messraster leichter übersehen werden können. Darüber hinaus führt die jeweils gegebene Betondeckung zu einer direkten Verschiebung der gemessenen Potentiale an der Betonoberfläche. Aufgrund des Abstandes zwischen aktiver Korrosion am Bewehrungsstahl und dem Abstand zur Betonoberfläche, fallen

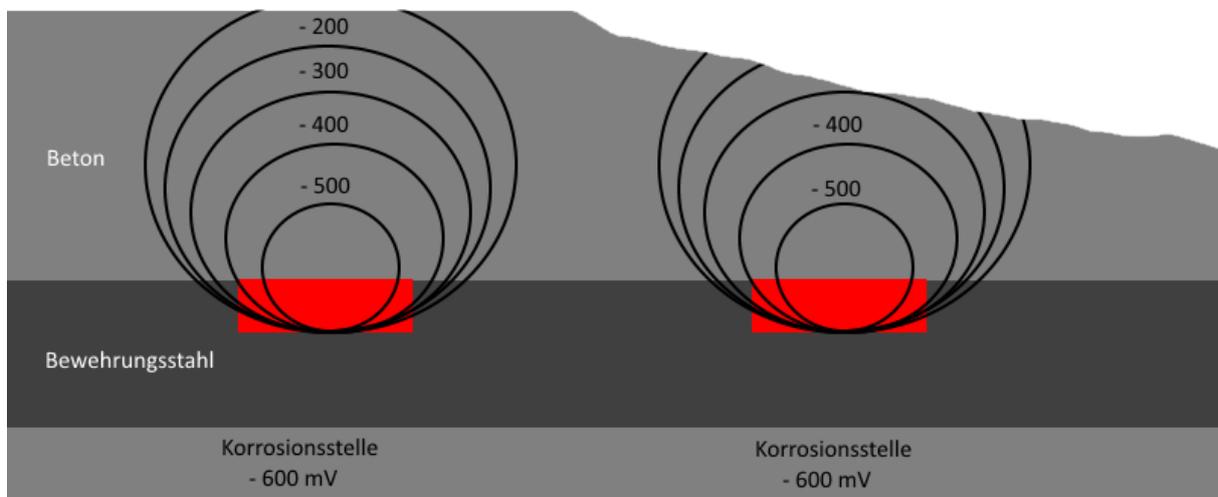


Abbildung 3: Einfluss der Betondeckung auf Potentialfeldmessung

die gemessenen Potentiale bei größerer Betondeckung positiver und bei geringer Betondeckung negativer aus.

Bei Betrachtung von absolut gemessenen Potentialen, kann dies in der Praxis dazu führen, dass potentiell korrosionsaktive Bereiche entweder übersehen bzw. nicht korrosionsaktive Bereiche fälschlicherweise als solche interpretiert werden. Da der Beton schließlich selbst einen Widerstand darstellt, hängen die an der Betonoberfläche gemessenen Potentiale ebenfalls stark von Materialparametern wie der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Betons oder dessen Feuchtigkeit (Siehe Unterkapitel 2.4) und somit ebenfalls von der entsprechenden Betondeckung ab.

Aufgrund der Bedeutung der Betondeckung für die Langlebigkeit von Stahlbetonbauwerken, sowie als wichtige Maßeinheit zur Interpretation korrelierender Messgrößen, gibt es vielfältige Ansätze zur zerstörungsfreien Erfassung der Betonüberdeckung. Die Wahl des Messverfahrens hängt von den jeweiligen Messanforderungen ab. Allgemein lässt sich jedoch sagen, dass alle Messverfahren maßgeblich vom Durchmesser sowie der Beschaffenheit des Bewehrungsstahls abhängen. Im Zuge dieser Arbeit fiel die Wahl auf das weit verbreitete und in der Praxis anerkannte Wirbelstrom- Verfahren. Der Vorteil des Wirbelstrom- Verfahrens liegt darin begründet, dass das Messprinzip nicht durch die Zusammensetzung und Feuchte des Betons beeinflusst wird. Zudem ist es als einziges Verfahren dazu in der Lage auch nichtmagnetisierbare Bewehrungsstähle (Edelstahl) zu detektieren.

Bei dem elektromagnetischen Wirbelstrom- Verfahren handelt es sich um ein induktives Messverfahren. Es macht sich die Änderung der Induktivität einer im Messgerät befindlichen Spule gegenüber dem Einfluss des Magnetfeldes des Bewehrungsstabes zunutze. Das Messgerät wird ohne aufzusetzen über die Betonoberfläche bewegt. Hierbei wird durch eine Erregerspule im Messgerät ein wechselndes Magnetfeld erzeugt, welches Wirbelströme im Bewehrungsstahl induziert. Die Wirbelströme erzeugen ein, in der Richtung entgegengesetztes Magnetfeld im Bewehrungsstahl. Dieses Magnetfeld wirkt auf das Feld einer zweiten Messspule im Messgerät zurück und erhöht dadurch

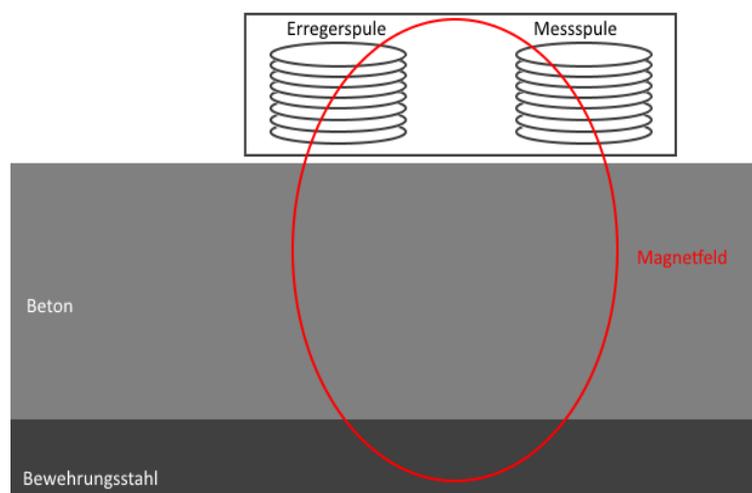


Abbildung 4: Messmethode des Wirbelstrom- Verfahrens

die Induktionsspannung, welche nun Messtechnisch erfasst werden kann (Vgl. DGZfP, 1999a [9]).

## **2.4 Elektrolytischer Betonwiderstand**

Viele Bauwerksschäden entstehen durch Einwirkung von Feuchtigkeit. Im Hinblick auf Bewehrungsstahlkorrosion spielt die Bauteilfeuchte gleich in zweierlei Hinsicht eine Rolle. Zum einen ist das Vorhandensein von Wasser -neben Sauerstoff- eine der Voraussetzungen für das Einsetzen von Korrosionsprozessen. Zum anderen dient Wasser als Transportmedium für Chloride. Diese bedingen und beschleunigen Korrosionsprozesse am Bewehrungsstahl (Siehe Unterkapitel 2.1). Klassischerweise werden zur Ermittlung der Bauteilfeuchte Stichproben entnommen, welche später im Labor mittels chemischer Verfahren oder durch Trocknung gravimetrisch bestimmt werden. Dies ist mit hohem Personal- und Zeitaufwand verbunden. Eine alternative hierzu stellen zerstörungsfreie Prüfverfahren zur direkten Ermittlung der Bauteilfeuchte vor Ort dar. Ein Ansatz die Bauteilfeuchte zerstörungsfrei zu bestimmen, besteht in der Ermittlung des elektrolytischen Betonwiderstands. Der elektrolytische Betonwiderstand beruht auf den dielektrischen Eigenschaften von Baustoffen und korreliert stark mit deren Feuchte- und Salzgehalten (Vgl. DGZfP, 1999b [10]). Dadurch ist es möglich die Bauteilfeuchte indirekt über den elektrolytischen Betonwiderstand zu bestimmen.

Aufgrund der hohen Leitfähigkeit von Wasser, weist feuchter Beton einen wesentlich niedrigeren elektrolytischen Betonwiderstand auf als trockener Beton. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Potentialfeldmessung. Je kleiner der elektrolytische Betonwiderstand der Prüffläche ist, desto negativer fallen die gemessenen Potentiale an der Betonoberfläche aus. Somit stellt der elektrolytische Betonwiderstand nicht nur eine Hilfsgröße zur indirekten Bestimmung der Bauteilfeuchte dar, sondern ist ebenfalls ein Bewertungskriterium hinsichtlich der Interpretation von Potentialfeldmessungen.

Während der Vertiefung in die theoretischen Grundlagen stellte sich jedoch heraus, dass die Messung des elektrolytischen Betonwiderstandes nicht mit den Spezifikationen für das zu entwickelnde Messsystem vereinbar war. Ohne Kenntnis über die Salzkonzentration innerhalb des Betons, können über den elektrolytischen Betonwiderstand keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Bauteilfeuchte gezogen werden. Die Bestimmung der Salzkonzentration, z.B. durch Entnahme und Analyse von Bohrkernen, widerspricht jedoch dem Ansatz der automatisierten und zerstörungsfreien Prüfung. Darüber hinaus würde die Vorwässerung der Prüffläche für die

Potentialfeldmessung (Siehe Kapitel 4) den elektrolytischen Betonwiderstand beeinflussen, was gegen den gleichzeitigen Einsatz beider Messverfahren spricht.

Als mögliche Alternative für die zerstörungsfreie Ermittlung der Bauteilfeuchte, bot sich das Mikrowellen- Verfahren an. Das Mikrowellen- Verfahren ist bei der Bestimmung der Bauteilfeuchte weitestgehend unabhängig von der Salzkonzentration des Betons. Das Messprinzip des Mikrowellen- Verfahrens macht sich die besonderen dielektrischen Eigenschaften des Wassers -also dessen Verhalten in elektromagnetischen Feldern- zunutze. Da die Ladungsschwerpunkte der einzelnen Ionen im Wassermolekül nicht lokal zusammenfallen, ist Wasser gut polarisierbar. In einem elektrischen Feld orientiert sich das Wassermolekül entsprechend der Ausrichtung des Feldes. Dies trifft auch auf andere Moleküle zu. Jedoch ist der Einfluss elektrischer Felder auf Wasser im Vergleich wesentlich größer. Unter Einfluss von Wechselfeldern können Moleküle in Rotation versetzt werden. Das Wassermolekül kann im Vergleich zu anderen Molekülen auch noch bei wesentlich höheren Wechselfeldfrequenzen in Rotation verbleiben. Dies kann messtechnisch erfasst werden (Vgl. hf-sensors.de, 2017 [11]). Während des Praktikums wurde daher eine Machbarkeitsstudie zur Verwendung von Mikrowellen- Messköpfen der Firma hf sensors durchgeführt. Es konnte zunächst eine Schnittstelle zum Computer umgesetzt werden. Die für die weitere Entwicklung des Systems notwendigen Steuerungsbefehle beruhen allerdings auf einem proprietären Protokoll der Firma hf sensors. Daher konnte während des Praktikums keine LabVIEW Anwendung für den automatisierten Betrieb der Mikrowellen- Messköpfe umgesetzt werden.

## 2.5 Potentialfeldmessung

Die elektrochemische Potentialfeldmessung ist ein etabliertes, zerstörungsfreies Messverfahren zur Detektion von aktiven, chloridinduzierten Korrosionswahrscheinlichkeiten des Bewehrungsstahls. In der Praxis findet das Verfahren vor allen Dingen in Fragen der Qualitätssicherung von Stahlbetonkonstruktionen Anwendung. Eine regelmäßige Kontrolle und Überwachung hinsichtlich des Umfangs sowie der Verteilung von Bewehrungsstahlkorrosion, ist fester Bestandteil von turnusmäßigen Untersuchungen von Stahlbetonbauwerken. Hierbei erweist sich die Potentialfeldmessung gerade bei der Vorbereitung von Instandsetzungsmaßnahmen als überaus nützliches Instrument. Das Verfahren findet schon seit über zwei Jahrzehnten Anwendung (Vgl. Sodekeit, 2010 [12]). Die Potentialfeldmessung ist ein schnelles, kostengünstiges und beinahe zerstörungsfreies Messprinzip. Hierbei können Bereiche des Bewehrungsstahls ermittelt werden, in welchen mit hoher Wahrscheinlichkeit Korrosionsprozesse stattfinden. Hierzu muss die Betonüberdeckung für die Bestandsaufnahme nicht geöffnet werden. Hinsichtlich der Kontrolle und Überwachung, sowie der Vorbereitung von Instandsetzungsmaßnahmen von Stahlbetonbauwerken stellen sich durch Anwendung der Potentialfeldmessung große Einsparungsmöglichkeiten an Zeit, Material und Geld ein.

Allerdings sind dem Verfahren auch einige Grenzen gesetzt. So eignet sich die Potentialfeldmessung nur zur Detektion von chloridinduzierten Korrosionen. Die bei der karbonatinduzierten Korrosion entstehenden Makroelemente (Siehe Unterkapitel 2.1) sind zu klein um durch die Potentialfeldmessung nachgewiesen werden zu können. Ebenso eignet sich das Verfahren nicht um bereits abgelaufene Korrosionsprozesse nachträglich nachzuweisen. Mit der Potentialfeldmessung können ausschließlich zum Zeitpunkt der Messung aktiv stattfindende Korrosionen erfasst werden. Auch können durch Potentialfeldmessungen keine Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit mit der die Korrosion fortschreitet (*Korrosionsrate*) oder den bisher eingetretenen Querschnittverlust des Bewehrungsstahls (*Korrosionsbetrag*) gezogen werden.

Schließlich bleibt zu erwähnen, dass es sich bei der Potentialfeldmessung um einen probabilistischen Ansatz handelt. Sie hilft dabei die Wahrscheinlichkeit von Korrosionsprozessen zu bestimmen. Die gemessenen Potentiale werden von vielen Umgebungsparametern beeinflusst. Die Interpretation der gemessenen Potentiale kann sehr komplex sein und sollte daher von geschulten Personal vorgenommen werden.

### 2.5.1 Prinzip der Potentialfeldmessung

Bei der Potentialfeldmessung wird die Potentialdifferenz zwischen dem Bewehrungsstahl und einer an der Oberfläche aufgesetzten Referenzelektrode gemessen. Hierfür muss zunächst die Bewehrung lokal freigelegt und mit einem elektrisch leitenden Kabel verbunden werden (*Bewehrungsanschluss*). Auch wenn die hierfür freizulegende Stelle klein ist, handelt es sich bei der Potentialfeldmessung praktisch betrachtet um keine vollkommen zerstörungsfreie Prüfmethode. Die Referenzelektrode und der Bewehrungsanschluss sind über ein hochohmiges Spannungsmessgerät (mit einer Impedanz zwischen  $10^6 \Omega$  und  $10^9 \Omega$ ) miteinander verbunden. Der hohe Widerstand des Spannungsmessgerätes dient dem Zweck, Potentialabweichungen durch zu hohen Stromfluss über das Verbindungskabel zu reduzieren. Um diese auf weniger als 1% zu beschränken, muss der Eingangswiderstand des Voltmeters ca. 100-fach größer sein, als der Widerstand durch den Beton (Vgl. concrete-concepts.eu, 2007 [13]).

Über das Spannungsmessgerät miteinander verbunden, bilden die Referenzelektrode und der Bewehrungsstahl ein galvanisches Element aus zwei Halbzellen (in Anlehnung hierzu, wird die Potentialfeldmessung im englischen Sprachraum als „half-cell potential measurement“ bezeichnet). Beide Halbzellen weisen ein unterschiedliches Potential auf. Diese Potentialdifferenz kann mit dem Spannungsmessgerät als Spannung (in mV) gemessen werden. Die Cu/CuSO<sub>4</sub> Referenzelektrode weist hierbei ein konstantes Potential auf. Bei bekanntem Potential der Referenzelektrode, kann aus der gemessenen Spannung zwischen Elektrode und Bewehrungsstahl das Potential auf der Betonoberfläche ermittelt werden. Aus dem Potential an der Betonoberfläche kann wiederum auf das Potential an der Oberfläche des Bewehrungsstahls geschlossen werden. Die Potentialwerte auf der Oberfläche des Bewehrungsstahls geben schließlich Aufschluss über mögliche Redoxreaktionen innerhalb der Bewehrung (Siehe Unterkapitel 2.1) und stellen somit einen Indikator für Korrosionsprozesse dar.

Die American Society for Testing and Materials (ASTM) hat zur Beurteilung von Potentialfeldmessungen näherungsweise Richtwerte zur groben Orientierung herausgegeben (aus Sodeikat, 2010 [12]):

<b>Potentialdifferenz zur Cu/CuSO<sub>4</sub> Halbzelle</b>	<b>Korrosionswahrscheinlichkeiten zur Zeit der Messung</b>
positiver als - 250 mV	< 10 %
- 250 mV bis - 350 mV	Keine Aussage möglich
negativer als - 350 mV	> 90 %

Der gemessene Potentialbereich kann in Abhängigkeit zu verschiedenen Umgebungsparametern über einen großen Bereich (mehrere 100 mV) schwanken. Das bedeutet, dass negative Potentialwerte nicht zwangsläufig auf eine aktive Korrosion schließen lassen. Eine bessere Aussagekraft bietet die Betrachtung der Potentialgradienten zwischen zwei Messpunkten. Wenn zwischen zwei nahe bei einander liegenden Messpunkten große Differenzen zwischen den gemessenen Potentialen auftreten (also bei steilen Potentialgradienten), ist die Wahrscheinlichkeit von Korrosion größer:

→ Gradienten < 100 mV/m unkritisch

→ Gradienten > 100mV/m steigende Korrosionswahrscheinlichkeit

Es hat sich daher gezeigt, dass die Betrachtung von Potentialgradienten der Betrachtung von absolut gemessenen Potentialen bei der Beurteilung von Korrosionswahrscheinlichkeiten vorzuziehen ist (Vgl. Dauberschmidt/ Vestner, 2010 [14]).

### **2.5.2 Prinzip der Differenzpotentialfeldmessung**

Wie weiter oben erwähnt, ist die konventionelle Potentialfeldmessung auf einen Bewehrungsanschluss angewiesen. Um einen Bewehrungsanschluss zu legen, muss zunächst festgestellt werden, wo genau dieser verläuft. Ist die Bewehrung lokalisiert muss die Betondeckung entfernt und ein Bewehrungsanschluss gelegt werden. Falls die Bewehrung nicht durchgängig ist, muss dieser Prozess an mehreren Stellen wiederholt werden. Dies ist nicht nur ein zeitintensives Unterfangen, sondern auch mit Personalkosten, sowie weiteren Kosten für die Wiederherstellung der offengelegten Stelle verbunden. Sinn der automatisierten Prüfung ist es, große Prüfflächen autonom durchmessen zu können. Die Größe der zu erfassenden Prüffläche wird hierbei von der Reichweite des Bewehrungsanschlusses limitiert. Das Verfahren der Differenzpotentialmessung bietet gegenüber der konventionellen Potentialfeldmessung den Vorteil ohne Bewehrungsanschluss auszukommen.

Bei der Differenzpotentialfeldmessung wird die Potentialdifferenz zwischen zwei Radelektroden gemessen und ins Verhältnis zu dem Abstand beider Elektroden gesetzt. Mit bekannten Elektrodenabstand kann somit der lokale Potentialverlauf (Potentialgradient) errechnet werden. Aus diesen Informationen kann ein Vektor ermittelt werden, welcher parallel zur Betonoberfläche in Richtung und Betrag dem Potentialgradienten entspricht. Zum besseren Verständnis dieses Prozesses wird die Differenzpotentialfeldmessung, anhand eines idealisierten Beispiels, Schritt für Schritt aus der Potentialfeldmessung heraus entwickelt.

## Radelektrode

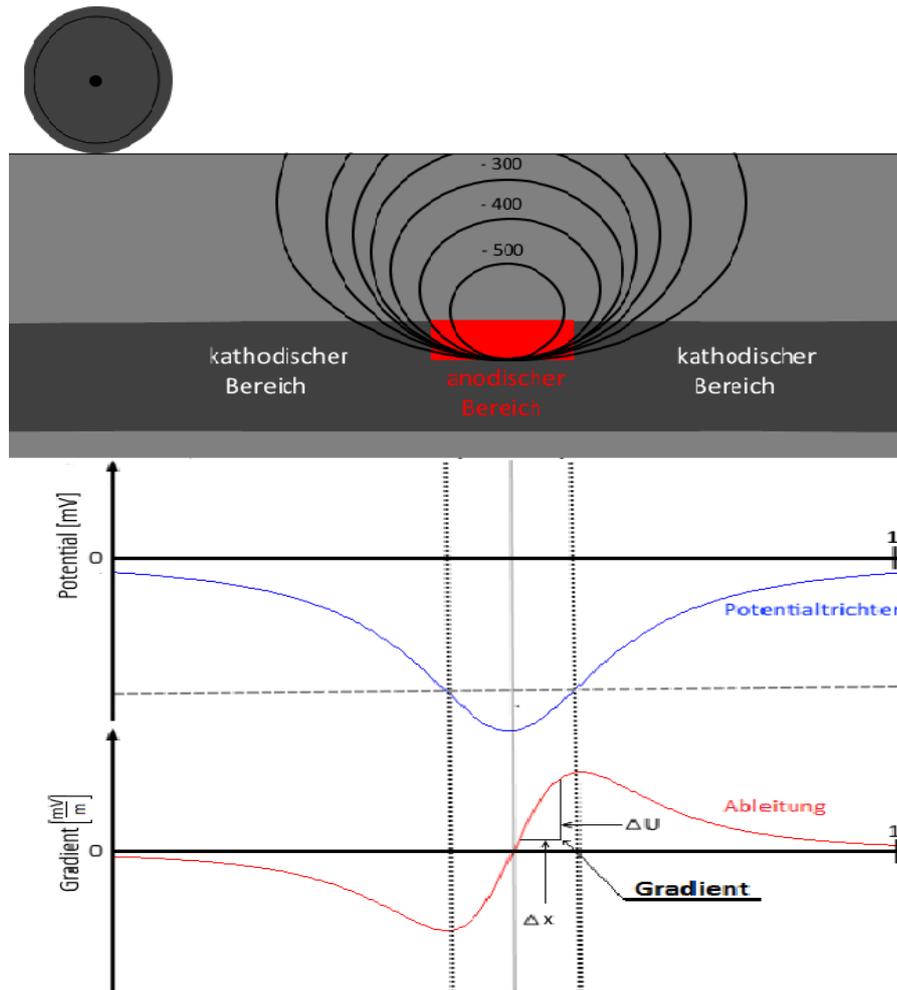


Abbildung 5: Beziehung zwischen Potential, Potentialtrichter und Potentialgradient

Bei der Potentialfeldmessung misst eine Radelektrode das Potential an der Betonoberfläche. Bewegt man die Radelektrode dabei und trägt die gemessenen Potentiale in Bezug zur Strecke auf einem Graphen auf, erhält man einen Potentialverlauf. Solche Potentialverläufe, lassen sich mathematisch als Funktionen darstellen. Bereiche über Anoden weisen hierbei negativere Funktionswerte als Bereiche über Kathoden auf. Die hierfür charakteristischen Potentialverläufe werden Potentialtrichter genannt. In der Abbildung X ist ein solcher Potentialverlauf in idealisierter Form als blauer Funktionsgraph dargestellt. Bei der Differenzpotentialmessung werden nicht die absoluten Potentiale gegenüber der Bewehrung, sondern Potentialdifferenzen zwischen einzelnen Elektroden gemessen. Werden entlang einer Messstrecke an mindestens zwei Messpunkten Differenzpotentialmessungen zwischen zwei Elektroden durchgeführt und ist zusätzlich noch den Abstand zwischen den gemessenen Punkten bekannt, lässt sich daraus der Potentialgradient errechnen. Die Summe dieser Gradienten bildet die Ableitung des Potentialverlaufes und ist hier als roter Graph dargestellt.

Integriert man die Gradienten entlang der Messstrecke erhält man Spannungsvektoren, welche in Länge und Orientierung den Potentialgradienten entsprechen. Um den Potentialtrichter durch Spannungsvektoren räumlich zuverlässig lokalisieren zu können, ist es jedoch notwendig ein Skalarprodukt mit einem weiteren Spannungsvektor zu bilden. Der aus diesem Skalarprodukt resultierende Gradientenvektor kann die tatsächlich vorhandenen Potentialtrichter abbilden. Der für die Bildung des Skalarprodukts nötige zweite Spannungsvektor muss hierbei in orthogonaler Richtung zum ersten bestimmt werden. Eine Möglichkeit dies zu erreichen besteht darin eine zweite Messspur in orthogonaler Richtung zur ersten abzufahren.

Das Institut für Bauforschung in Aachen entwickelte ein Differenzpotentialverfahren, welches zur Bestimmung der Potentialgradienten auch ohne orthogonale Messspuren auskommt. Die hierzu entwickelte Delta- Sonde (Abbildung 6) besteht aus drei Radelektroden, welche in Formation eines Dreiecks angeordnet sind. Bei dieser Anordnung stehen zwei Elektroden parallel zueinander; die dritte jedoch orthogonal hierzu. Durch diese Elektrodenanordnung können beide Spannungsvektoren zur Bildung des Skalarproduktes ermittelt werden, ohne hierzu eine weitere Messspur in orthogonaler Richtung abfahren zu müssen (Reichling, 2011 [4]). Der aus diesem Skalarprodukt resultierende Gradientenvektor kann schließlich die tatsächlich vorhandenen Potentialtrichter abbilden. Im Zuge dieser Arbeit wurde daher dieselbe Elektrodenmessanordnung (Abbildung 7) gewählt.

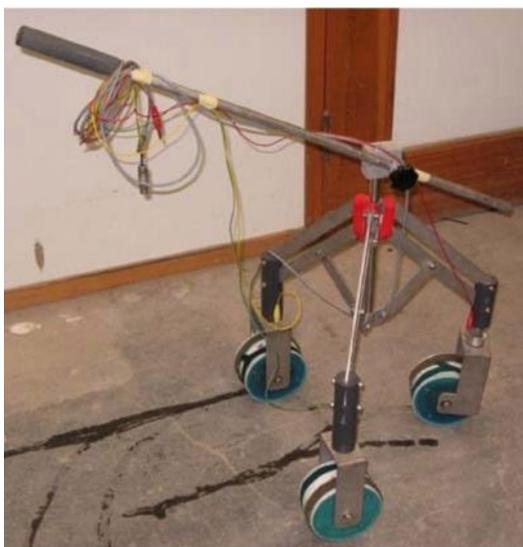


Abbildung 6: Delta- Sonde der IBAC

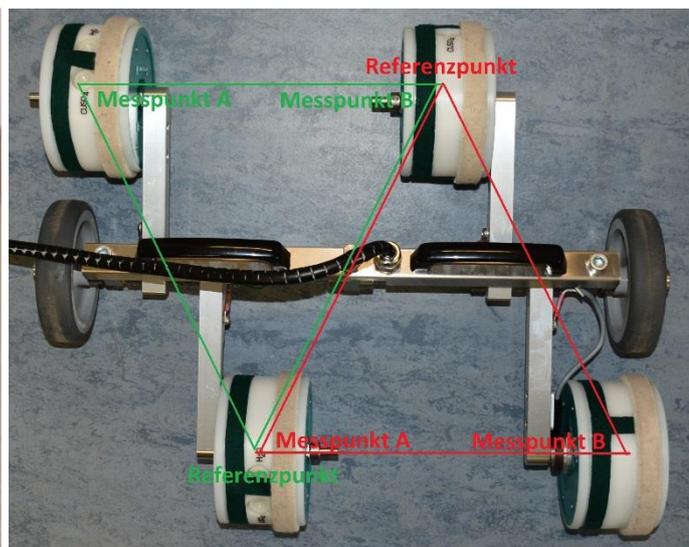


Abbildung 7: Vierradelektrode mit Delta- Sonden Setup

Mit dieser Messanordnung können nun beide Komponenten des Gradientenvektors zugleich bestimmt und nach folgender Formel integriert werden (Stoppel, 2011 [3]):

$$U_{\text{Pot}}(x, y) = \int \frac{U_{\text{diff}_x}(x, y)}{\Delta x} dx + \int \frac{U_{\text{diff}_y}(x, y)}{\Delta y} dy + C$$

Hierbei entsprechen die Integrale von dx und von dy den beiden Komponenten des Gradientenvektors.  $\Delta x$  ist die zwischen zwei Messungen zurückgelegte Wegstrecke und  $\Delta y$  der fixe Abstand zwischen Mess- und Referenzelektrode (Siehe Abbildung 7). Bei C handelt es sich um die Integrationskonstante. Im Fall der Differenzpotentialfeldmessung ist dies eine Offsetspannung. Um von den Differenzpotentialwerten auf die tatsächlichen Potentialwerte schließen zu können, muss diese Offsetspannung auf die Ergebnisse umgelegt werden. Um die Offsetspannung zu bestimmen ist eine einmalige Referenzmessung gegen die Bewehrung jedoch weiterhin nötig. Wie jedoch in Abschnitt 2.5.1 bereits beschrieben, kann die Bewertung von Korrosionswahrscheinlichkeiten in der Regel besser auf Grundlage der Gradienten als auf Grundlage der absoluten Potentialwerte vorgenommen werden.

### **3. Realisierung der Messsysteme**

In folgendem Kapitel wird die Entwicklung der einzelnen Messsysteme behandelt. Speziell im Hinblick auf die Differenzpotentialfeldmessung erfolgte diese in enger Abstimmung zu den parallel durchgeführten Testmessungen. Viele der vorgenommenen Optimierungen des Systems ergaben sich direkt aus den bei den Tests gewonnenen Erkenntnissen. Der Übersichtlichkeit halber liegt der Fokus in diesem Kapitel daher auf der Realisierung der Schnittstellen sowie der Meilensteine bei der Umsetzung der Anwendungen. Durchführung der Testmessungen, deren Ergebnisse und daraus folgende Anpassungen an den Anwendungen werden anschließend im Kapitel 4 gesondert behandelt.

#### **3.1 Verwendete Datenerfassungskomponenten**

Wie im Kapitel 2.1 bereits angerissen, beinhaltet die Architektur von Datenerfassungssystemen neben Sensor und Computer auch noch Datenerfassungsgeräte als Übersetzer von analogen und digitalen Signalen. Um die Daten durch den Computer auf höherer Ebene sinnvoll verarbeiten zu können, sind weiterhin Programme erforderlich. Daher bilden die verwendeten Datenerfassungssysteme die Grundlage sämtlicher im Zuge dieser Arbeit entwickelten Messsysteme. In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Komponenten der Datenerfassung kurz vorgestellt.

##### **3.1.1 LabVIEW**

Um ein aus verschiedenen Systemen bestehendes Kombi- Messsystem zu realisieren, erschien es hinsichtlich der späteren Kommunikation sowie der Wartung der einzelnen Subsysteme sinnvoll, die Unterprogramme von vorne herein mittels einer einzigen Programmiersprache zu realisieren. Die Wahl fiel hierbei auf LabVIEW. Bei LabVIEW handelt es sich um eine grafische Entwicklungsumgebung der Firma National Instruments (NI). Im Gegensatz zu Entwicklungsumgebungen auf Grundlage von textbasiertem Quellcode, zeichnet sich LabVIEW durch eine intuitive, visuelle Darstellung des Programmcodes aus. Die Entwicklung des Programmcodes und der späteren Benutzeroberfläche wird dabei auf zwei, inhaltlich und grafisch voneinander getrennten Ebenen vollzogen. Die eigentliche Programmierung findet in Blockdiagrammen statt. Diese bleiben dem späteren Anwender während der Laufzeit des Programmes jedoch verborgen. Die für den Programmablauf benötigten Eingaben und Einstellungen sowie die Ausgabe von Messdaten erfolgt über das Frontpanel. Hier können

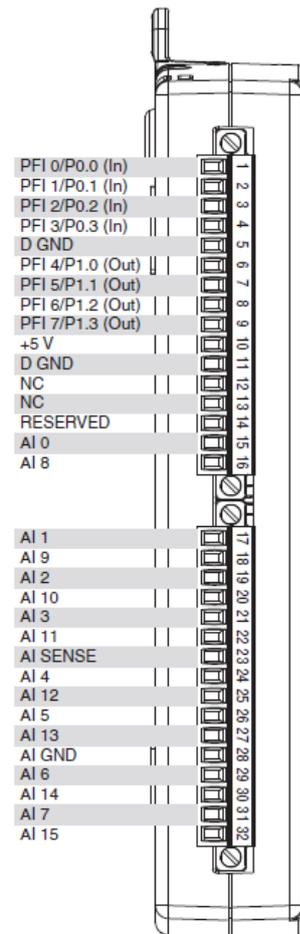
verschiedene Bedien- und Anzeigeelemente angeordnet werden. Auf diese Weise ist die innere Logik des Programmes von seiner Bedienung getrennt und der Anwender kann sich auf die wesentlichen Aufgaben konzentrieren.

Im Gegensatz zu befehlsorientierten Programmiersprachen, findet die Programmierung bei LabVIEW auf Grundlage des Datenflussprinzips statt. Das bedeutet, dass die Ausführungsreihenfolge der Funktionen durch den Datenfluss entlang des Weges zwischen den einzelnen Knoten im Blockdiagramm bestimmt wird. Knoten sind hierbei Funktionsblöcke (VIs -> Virtual Instruments), welche über kleine Icons grafisch dargestellt werden. Diese Funktionsblöcke weisen vordefinierte Ein- und Ausgänge auf. Die innere Logik der Funktionsblöcke ist hierbei von außen nicht ersichtlich. Dies steigert die Übersichtlichkeit bei komplexeren Programmen. Komplexere Programme entstehen hierbei durch Verbindung einzelner Funktionsblöcke über „Drähte“ (Analog zu realen Drähten, leiten diese die Signale in LabVIEW weiter). So entstehen nach und nach immer komplexere Strukturen, welche entweder direkt als eigenständige Programme (Diese werden ebenfalls als VIs bezeichnet!) oder als Unterprogramme (Sub-VIs) gespeichert werden können. Sub- VIs können auch innerhalb anderer VIs verwendet werden. Somit ist es möglich immer umfassendere Programme durch Verschachtelung von VIs und Sub- VIs zu erstellen, ohne dass diese dabei zu unübersichtlich zu werden.

Gründe die für die Wahl von LabVIEW als Entwicklungsumgebung sprachen, waren vor allen Dingen seine Funktionalität im Bereich der Messsystementwicklung, sowie die einfache Realisierung von Schnittstellen. LabVIEW ist eine Programmierumgebung deren Schwerpunkt auf Mess- und Automatisierungstechnik liegt. Die Hardwarekompatibilität, speziell zu anderen Geräten von NI (wie dem verwendeten DAQ- System), aber auch zu anderer Hardware, erleichterte die Entwicklung von Schnittstellen. Um schnell eigene Anwendungen erstellen zu können, bietet LabVIEW bereits viele vorgefertigte VIs in Funktionsbibliotheken zur Verfügung. Diese Funktionsbibliotheken stellen eine thematische Sammlung häufig genutzter Funktionen dar. Aufgrund des Umfanges an bereitgestellten VIs sind diese in speziellen Paletten (z.B. VI- Paletten für mathematische Fragestellungen oder VI- Paletten mit Schwerpunkt auf der Datenverarbeitung) organisiert. Weitere Funktionsbibliotheken werden in Form von Add-Ons zur Verfügung gestellt. Durch umfangreiche Dokumentation, bereitgestellten Beispielanwendungen und Onlinesupport erfolgt die Einarbeitung trotzdem schnell (Vgl. NI, 2017b [15]).

### 3.1.2 NI USB- 6210

Für die Datenerfassung wurde das NI USB- 6210 von National Instrument gewählt. Hierbei handelt es sich um ein Multifunktions- Datenerfassungsgerät (DAQ), welches speziell für den Gebrauch mit LabVIEW entwickelt worden ist. Das DAQ fungiert als Ein- und Ausgabegerät zur Kommunikation zwischen den Messgeräten und dem Computer. Die Hauptaufgabe des Geräts besteht in der Umwandlung von Analog- und Digitalsignalen. Hierbei kann das DAQ gleichermaßen analoge in digitale Signale und digitale in analoge Signale umwandeln. Darüber hinaus, verfügt das DAQ noch über Counter- und Timer- Funktionen zur zeitlichen Steuerung digitaler Ein- und Ausgaben. Der integrierte, programmierbare NI-PGIA- Verstärker garantiert auch bei kleinen Strömen eine gute Signalaufbereitung sowie hohe Abtastraten (250 kS/s → 250 kHz) bei einer 16 Bit Auflösung. Es verfügt über 16 Analogeingänge (bzw. 8 Differentialeingänge) mit Impedanzen im 10 GΩ- Bereich. Aus der Belegung der Analogeingänge in Bezug zu ihren Masseanschlüssen resultieren unterschiedliche interne Schaltungsarten. Die Art der gewählten Verschaltung hat großen Einfluss auf die Messungen und muss daher im Hinblick auf die jeweilige Messaufgabe bewusst gewählt werden. Neben den Analogeingängen besitzt das DAQ außerdem noch jeweils vier programmierbare, digitale Ein- und Ausgänge, drei Masseanschlüsse sowie einen 5 V Versorgungsanschluss. Ein USB- Anschluss bildet die Schnittstelle zum Computer (Vgl. NI, 2014 [16]).



NC = No Connect

Abbildung 8: Verfügbare Kanäle des NI USB- 6210

Die Hauptgründe für die Wahl des NI USB- 6210 lagen in der Kompatibilität zu LabVIEW und der breiten Funktionalität mit den erforderlichen Spezifikationen für die vorgesehenen Messsysteme. Im Hinblick auf die vorgesehene Montage am BetoScanLight, war schließlich auch noch das kompakte Format des Geräts ein weiteres Argument für die Wahl des NI USB- 6210.

### 3.1.3 NI- DAQmx

Bei dem NI- DAQmx handelt es sich um den Hardwaretreiber für die Multifunktionsdatenerfassungsgeräte von National Instruments. Neben der Steuerung auf Betriebssystemebene bietet NI- DAQmx viele Möglichkeiten zur Konfiguration von Datenerfassungsgeräten, sowie ihrer Anwendungen. Der Treiber umfasst zudem eine beträchtliche Erweiterung der datenerfassungsbezogenen Funktionsbibliotheken in LabVIEW. Eine besonders nützliche Erweiterung ist der DAQ- Assistent. Der DAQ- Assistent hilft bei der Konfiguration von Schnittstellen. So können verschiedene ans System angeschlossene Messgeräte über Tasks gebündelt und gemeinsam angesteuert werden. Durch die Bündelung über Tasks, lassen sich verschiedene Gruppen von Messgeräten mit jeweils individuellen Steuerungskonfigurationen erstellen, speichern und später an anderer Stelle wiederverwenden. Ein weiterer Bestandteil des Treiberpakets ist die NI MAX (Measurement & Automation Explorer) Software. Die Software ermöglicht unter anderem die Ausführung von Hardware- und Systemdiagnosen und bietet Unterstützung bei der Kalibrierung der angeschlossenen Datenerfassungsgeräte. Durch die Generierung von virtuellen Kanälen, können über den NI MAX auch Messsysteme zu Testzwecken simuliert werden (NI, 2014 [16]).

## 3.2 Hilfssysteme

In diesem Unterkapitel wird auf zusätzliche Systeme zur Erfassung von weiteren Umgebungsparametern eingegangen.

### 3.2.1 Wegstreckenerfassung

Kombinierte Messsysteme beruhen auf der Idee, durch den Vergleich unterschiedlicher Daten höhere Aussagesicherheit bei der Bewertung von Messergebnissen treffen zu können. Um die erhobenen Messdaten später zueinander in Bezug setzen zu können, müssen daher ebenfalls Informationen hinsichtlich ihrer Lage auf der Prüffläche gesammelt werden; d.h. die Daten müssen Ortsreferenziert sein. Eine Ortsreferenzierung auf geraden Prüfstrecken lässt sich durch Bildung von Tupeln aus den gemessenen Daten und der Wegstrecke realisieren. In Hinblick auf die Differenzpotentialfeldmessung, dient die Wegstreckenmessung zudem noch als Parameter für die Ermittlung der Potentialgradienten.

Zur Erfassung der Wegstrecke wurde zunächst der LabVIEW Code für Steuerung des BetoScan Light weiterentwickelt. Das Programm wurde dahingehend angepasst, dass die schrittweise Fahrt (Vgl. Hauke, 2017 [2]) des BetoScan Light nicht mehr zeitlich anhand von Schleifendurchläufen gesteuert, sondern durch eine direkte Wegstreckenvorgabe bestimmt wird. Ein VI aus dem EPOS- Treiberpaket für LabVIEW konnte dann die aktuelle Position des Motors auslesen. Um die Vierradelektrode auch als selbständiges Gerät nutzen zu können, war die Erfassung der Wegstrecke über die Motoren des BetoScan Lights nicht ausreichend.

Um aus einzelnen Potentialmessungen auf Potentialfelder zu schließen zu können, besitzt die Vierradelektrode von Proceq eine eigene Wegstreckenerfassung. Hierbei handelt es sich um den magnetischen Inkrementaldrehgeber MDFK 08T7101 der Firma Baumer (baumer.com, 2017 [17]).

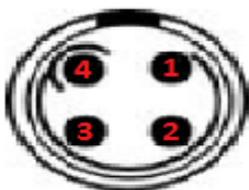


Abbildung 9: Vierradelektrode mit magnetischem Inkrementaldrehgeber

Der Drehgeber besitzt eine Hohlwelle und ist auf der Radachse der Elektrode A (Siehe Unterkapitel 3.4) montiert. Das Gerät gibt relativ zu der Auslenkung der Radelektrode Signale in Form von Spannungsimpulsen aus. Der MDFK liefert 256 Signale pro Umdrehung. Tatsächlich liefert das Gerät nur 128 Schaltzustände in Form von angelegter, bzw. nicht angelegter Spannung. Die Genauigkeit verdoppelt sich hierbei durch die Zählung der Spannungsflanken. Es gibt zu jedem Impuls eine steigende sowie eine fallende Flanke. Der MDFK ist ein Zweipuls- Encoder. Er arbeitet mit den zwei Kanälen A und B, wobei der Kanal A steigende und Kanal B fallende Flanken zählt. Durch das Zählen aufsteigender und abfallender Flanken verdoppelt sich die Auflösung des Drehgebers. Darüber hinaus lassen sich Flanken auch als Trigger, beispielsweise für das starten oder das beenden von Messungen nutzen (Siehe Kapitel 4).

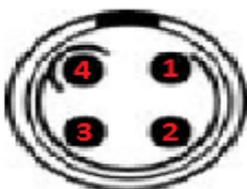
Die Anschlüsse des Drehgebers sind zusammen mit den Signaldrähten der Radelektroden über ein 2,5 m langes Verbindungskabel auf einem vierpoligen Lemo- Stecker aufgelegt. Zum aufschlüsseln der Kabeldrähte, wurde die entsprechende Buchse (Typ: FGG.0B.304.CLAD52Z) bestellt und verdrahtet. Für die Erfassung der Wegstrecke wurden anstatt der analogen Eingangskanäle, die PFI- (Programmable Function Interface) Kanäle des DAQ genutzt. Diese programmierbaren Kanäle können digitale Signale erfassen und diese wie im Falle der Flanken zählen.

## Lemo Stecker



- 1. Braun : +Vs
- 2. Blau : GND
- 3. Schwarz: CH A
- 4. Weiß : CH B

## Lemo Buchse



- 1. Braun : +Vs
- 2. Blau : GND
- 3. Schwarz: CH A
- 4. Weiß : CH B

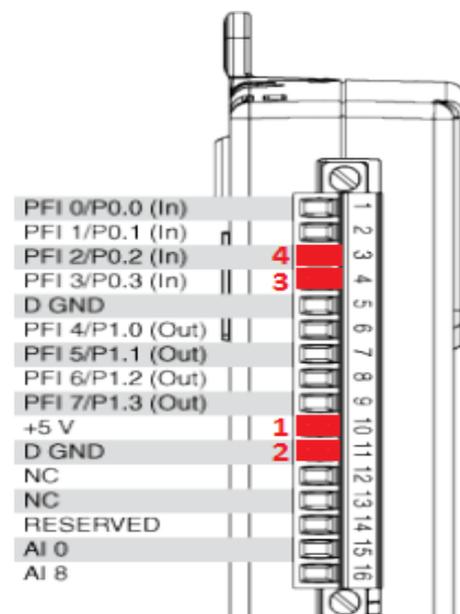


Abbildung 10: Anschlüsse der Wegstreckenerfassung

Für die Erfassung der Signale wurden zunächst mittels DAQ- Assistent ein Task zur zählergestützten Erfassung von Flanken erstellt. In diesem Task konnten die entsprechenden Kanäle ausgewählt und Konfigurationen hinsichtlich der zu erfassenden Flanken getroffen werden. Zur besseren Auslagerung in andere Anwendungen wurde der Task in LabVIEW Code umgewandelt. Das im Funktionspaket des DAQmx (Siehe Abschnitt 3.1.3) enthaltene VIs zur Auslesung von Messkanälen zählt die Flanken anhand der vom Drehgeber ausgegebenen digitalen Impulse. Die gezählten Flanken werden daraufhin zunächst in die Winkelsumme und dann weiter in die zurückgelegte Wegstrecke umgerechnet.

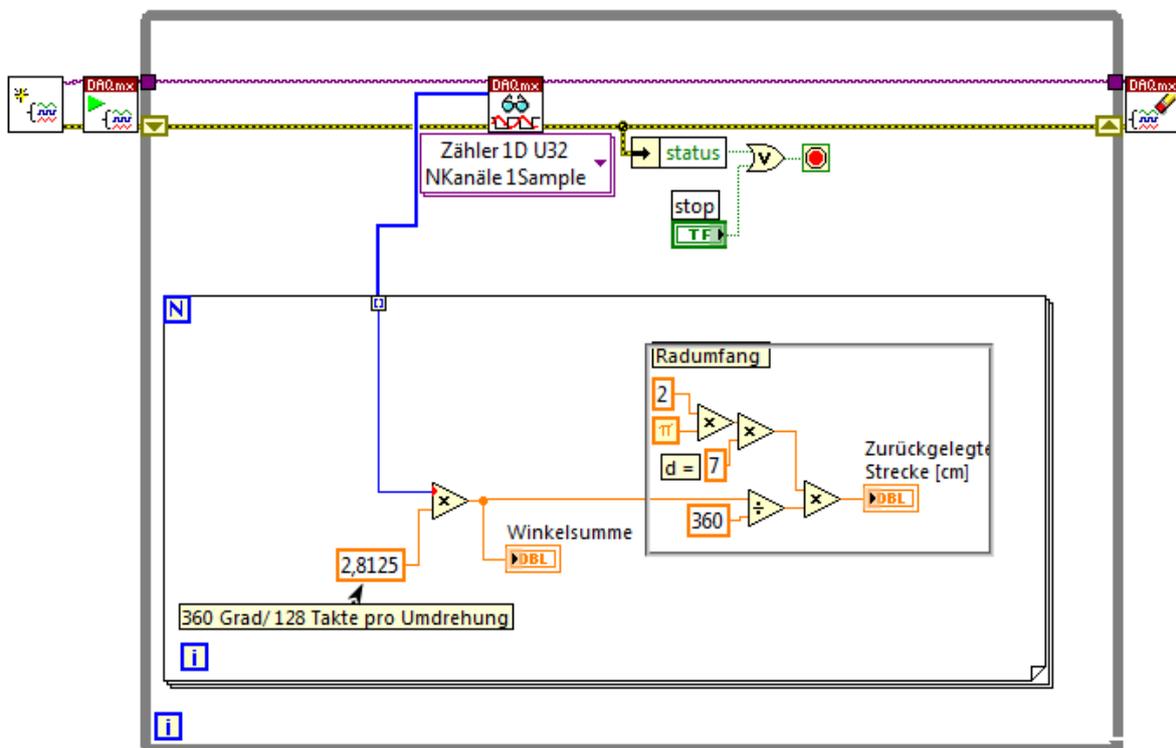


Abbildung 11: Blockdiagramm der Wegstreckenerfassung

### 3.2.2 Relative Luftfeuchtemessung

Die relative Luftfeuchtigkeit hat Auswirkungen auf die oberflächennahe Bauteilfeuchte. Daher stellt sie einen für die Potentialfeldmessung wichtigen Parameter dar. Für die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit wurde der HIH- 5030 Sensor von Honeywell verwendet. Im Sensor befindet sich ein Duroplast, dessen Kapazität bei höherer Luftfeuchte zunimmt. Die daraus resultierende Spannungsänderung kann am Ausgang gemessen werden. Die Spannungsversorgung wurde über DAQ bereitgestellt.

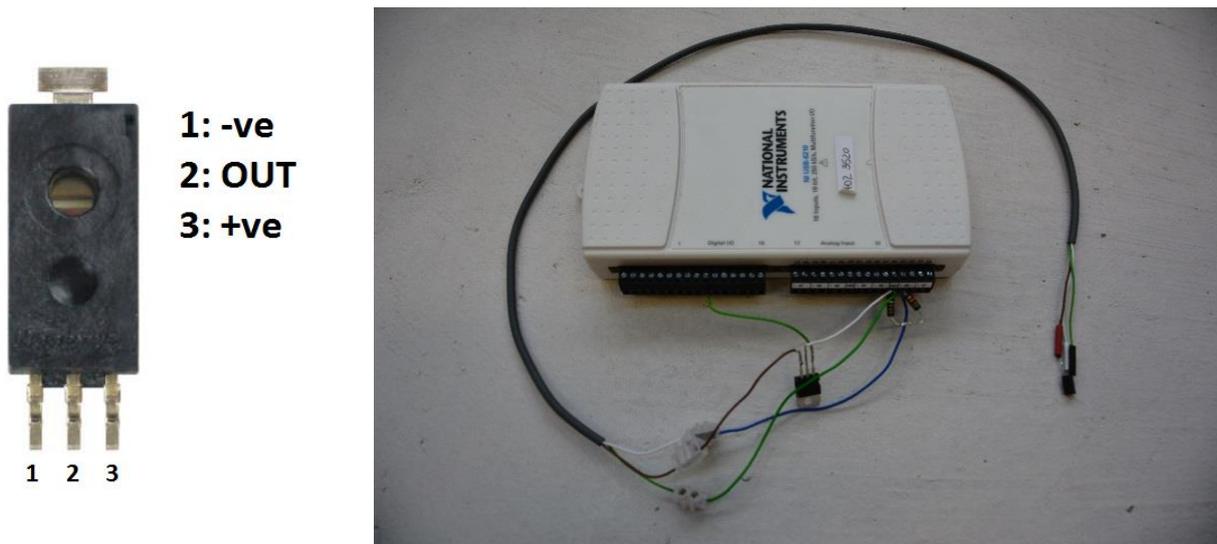


Abbildung 12: HIH- 5030 Feuchtigkeitssensor  
Abbildung 13: Anschlüsse für die Messung der relativen Luftfeuchte

Da die optimale Eingangsspannung des Gerätes bei 3,3 Volt liegt, wurde zwischen dem 5 V Versorgungsanschluss des DAQ und dem HIH- 5030 noch ein Spannungswandler (Typ: LFXX TO- 220) zwischengeschaltet. Ein 65 kΩ Widerstand zwischen Signalausgang und Masseanschluss begrenzt den Stromfluss durch den empfindlichen Sensor.

Um von der Spannungsänderung auf die relative Luftfeuchte [in %] schließen zu können, muss der gemessene Spannungswert noch umgerechnet werden. Die für diese Umrechnung nötige Ausgangsspannungsgleichung findet sich in den Datenblättern (sensing.honeywell.com, 2017 [18]) und lautet:

$$V_{OUT} = (V_{SUPPLY}) \cdot (0,00636(\text{sensor RH}) + 0,1515)$$

Für die Berechnung in LabVIEW musste diese noch nach sensor RH umgestellt werden:

$$\text{sensor RH} = \frac{\frac{V_{OUT}}{V_{SUPPLY}} - 0,1515}{0,00636}$$

Die Umrechnungsformel bezieht sich hierbei auf eine Eichkurve, welche für eine Durchschnittstemperatur von 25 °C entwickelt wurde. In extremen Umgebungen muss die Formel umgestellt und um eine Temperaturvariable ergänzt werden. In LabVIEW wurde zunächst ein Signalverlaufsdiagramm initialisiert. Dieser wird fortlaufend um weitere Datensätze aus einer Schleife ergänzt. In der Schleife wird alle 10 Millisekunden die Ausgangsspannung erfasst und in die relative Luftfeuchtigkeit umgerechnet. Das Ergebnis wird als Fließkommazahl und in Form einer Thermometer Grafik auf dem Fronpanel ausgegeben.

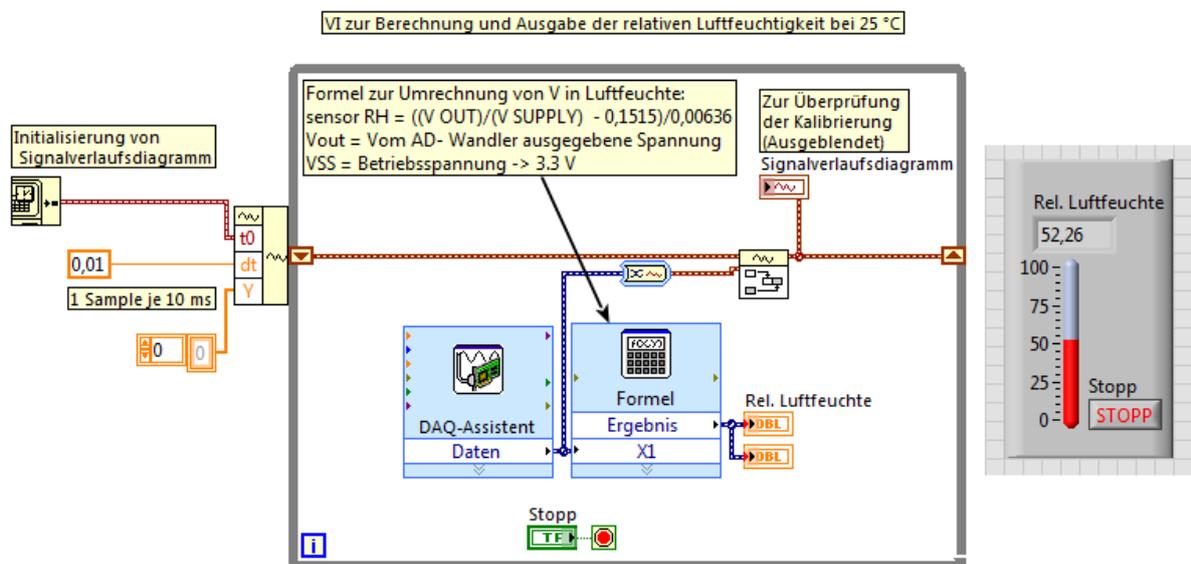


Abbildung 14: Blockdiagramm zur Messung der relativen Luftfeuchte

### 3.3 Betonüberdeckung

Das im Zuge dieser Arbeit verwendete Gerät zur Messung der Betondeckung, war das Profoscope aus dem Hause Proceq (proceq.com, 2017 [19]). Das Profoscope zeichnet sich durch eine leichte Handhabung, sowie durch die Messung der Betonüberdeckung und Ortung des Bewehrungsstahls in Echtzeit aus. Die Messdaten werden hierbei über ein Display ausgegeben. Eine im Gerät integrierte Leuchtanzeige hilft bei der genauen Ortung sowie der Bestimmung der Ausrichtung einzelner Bewehrungsstäbe. Neben der Ermittlung der Betonüberdeckung und der Ortung von Bewehrungsstahl kann das Gerät bei bekannter Betonüberdeckung auch den Durchmesser des Bewehrungsstahls ermitteln. Der Messbereich des Profoscope liegt bei bis zu 185 mm bei einer Messgenauigkeit von  $\pm 1$  bis 4 mm.



Abbildung 15: Profoscope

Um die gemessenen Daten zu speichern und zu bearbeiten bietet Proceq die Software Profolink an. Um zum einen eine individuellere Datenverarbeitung zu ermöglichen und zum anderen die Kommunikation zwischen den verschiedenen Messsystemen zu erleichtern, wurde im Zuge dieser Arbeit auf die Verwendung von Profolink zugunsten einer eigens entwickelten LabVIEW Anwendung verzichtet.

Der Datentransfer zum PC erfolgt über eine USB Schnittstelle und die Kommunikation mit dem Gerät wurde auf Grundlage des USB Test & Measurement Class (USBTMC) Protokolls realisiert. Bei dem USBTMC handelt es sich um ein USB- Erweiterungsprotokoll, welches die Kommunikation mit USB Geräten auf Basis von gerätespezifischen Steuerungsbefehlen (Remote Control Commands) ermöglicht. Steuerungsbefehle sind bytencodierte Anweisungen zum Steuern von Geräten (z.B. Anweisungen zum Senden oder Empfangen von Daten). Um eine LabVIEW- Anwendung für die Betondeckungsmessung zu entwickeln, wurde die LabVIEW NI VISA (Virtual Instrument Software Architecture) Schnittstellenarchitektur genutzt. Mittels NI VISA kann man in LabVIEW mit den meisten geläufigen BUS- Systemen wie GPIB, USB, Seriellen- und Ethernet Schnittstellen kommunizieren.

Eine typische VISA Anwendung ist folgendermaßen aufgebaut (Vgl. NI, 2012 [20]):

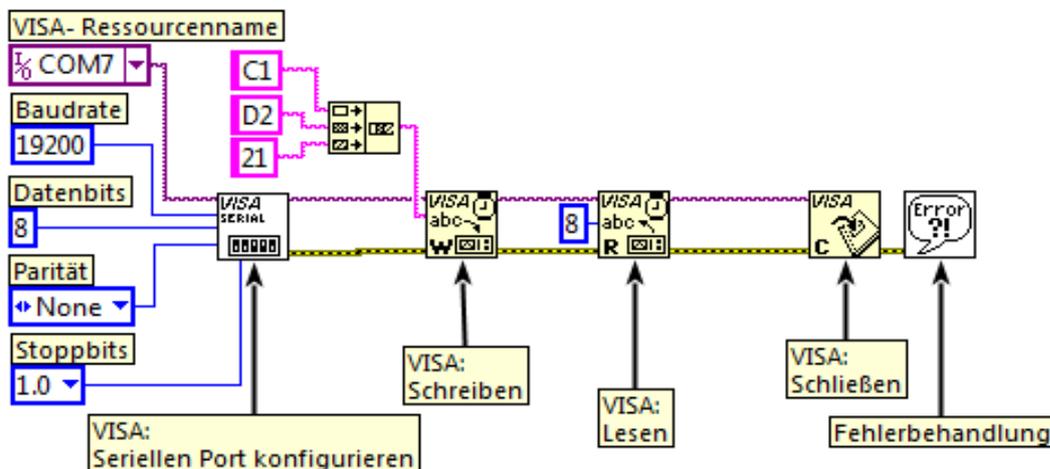


Abbildung 16: Grundlegender Aufbau einer VISA Anwendung

### Seriellen Port konfigurieren:

Initialisiert den gewählten seriellen Port mit dem angeschlossenen Gerät. Die Konfiguration erfolgt entsprechend den Vorgaben des Geräteherstellers (Hier: die des Profoscope). Der VISA-Ressourcenname ist die Port- Adresse des anzusprechenden Geräts. Die Baudrate ist ein Maß dafür, wie oft ein Signal seinen Zustand pro Sekunde ändert. Im Falle des Profoscope kann das Signal 19200 mal pro Sekunde seinen Zustand von Null zu Eins oder von Eins zu Null ändern. Somit legt die Baudrate die Übertragungsgeschwindigkeit fest. Es ist wichtig den Computer entsprechend zu konfigurieren damit die Kommunikation zwischen Computer und Messgerät Synchron verlaufen kann. Datenbits geben die Anzahl der zu erwartenden eingehenden Bits an. Unter Parität lassen sich ggf. Kontrollbits einfügen, um Aussagen über die Vollständigkeit gesendeter Datensequenzen zu erlangen. Die Verwendung von Stoppbits dient der Synchronisation von asynchronen Datenübertragungen.

### Schreiben:

Die hexadezimalcodierten Steuerungsbefehle für das Profoscope wurden von Proceq zu Verfügung gestellt. Diese werden als Zeichenketten an das VI VISA: Schreiben übergeben und von diesem an das unter dem VISA- Ressourcenamen angegebene Gerät gesendet (Im Beispiel der Get Cover- Befehl).

### Lesen:

Gibt die vom Gerät empfangenen Bytes sowie die den zu erwartenden Ausgabewert im Lesepuffer aus.

Mit den von der Firma Proceq zur Verfügung gestellten Steuerungsbefehlen für das Profoscope, konnte eine für die gegebene Problemstellung optimierte LabVIEW Anwendung realisiert werden. Beim Starten der Anwendung wird zunächst eine automatische Kalibrierung des Messgerätes durchgeführt. Neben der Ausgabe der Betondeckung als Ganzzahl beinhaltet die Entwickelte Anwendung eine graphische Visualisierung der Messdaten. Des Weiteren ist es möglich verschiedene Bewehrungstahldurchmesser sowie die gewünschte Abtastrate auszuwählen.

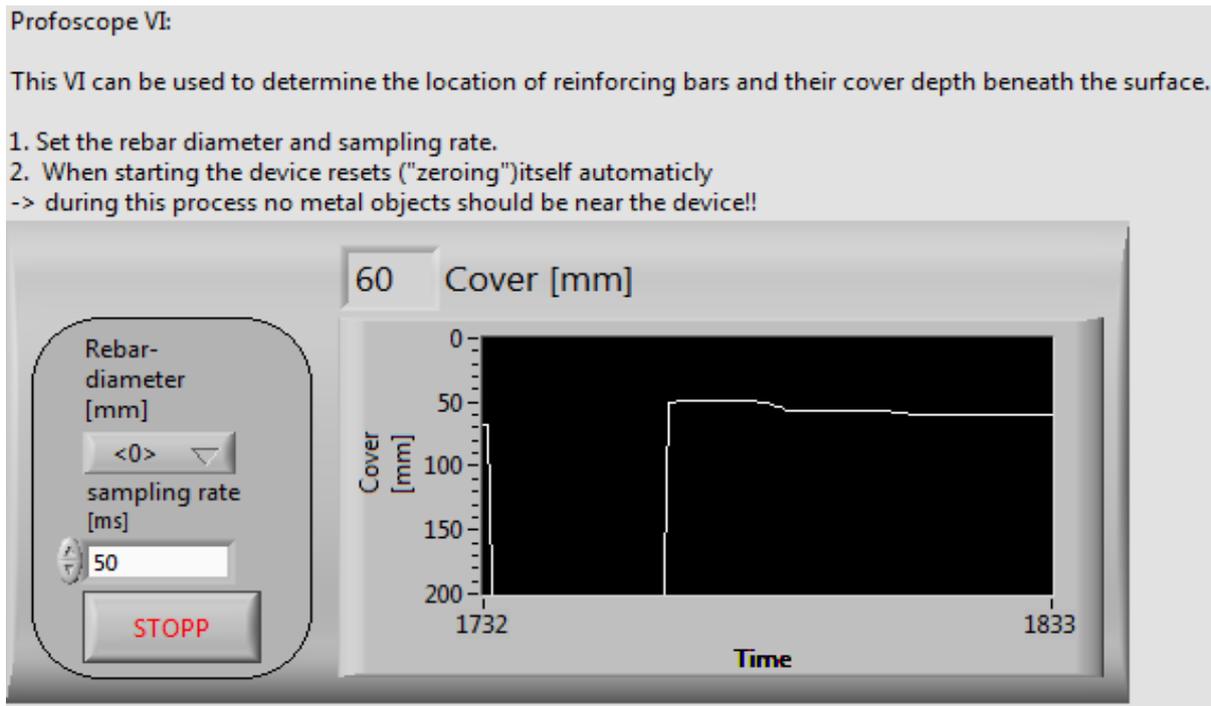


Abbildung 17: Front Panel der Betondeckungsmessung

Theoretisch ließe sich mit dem Messgerät bei bekannter Betonüberdeckung auch der Durchmesser des Bewehrungsstahls ermitteln. Hierfür muss das Messgerät direkt über der zu erfassenden Stäbe positioniert werden. Da die Bestimmung des Bewehrungstahldurchmessers in der Praxis eher selten benötigt wird und die Messung von Hand hierbei einfacher ist als bei automatisierter Fahrt, wurde von der Entwicklung dieser Funktion abgesehen.

### 3.4 Differenzpotentialfeldmessung

Kern dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Messsystems zur Realisierung der Differenzpotentialfeldmessung. Das hierfür verwendete Messgerät ist die Vierradelektrode von Proceq. Anders als Stabelektroden messen Radelektroden über die gesamte zur Messung vorgesehene Messstrecke kontinuierlich. Dies stellt ein wesentliches Kriterium für die automatisierte Messung von Differenzpotentialen dar. Weiterhin bietet die Vierradelektrode aufgrund ihres modularen Aufbaus gegenüber Einradelektroden den Vorteil, ein breiteres Messfeld abzudecken. Der Einsatz von Vierradelektroden ermöglicht somit schnellere Messungen, als der Einsatz von Stab- oder Einradelektroden.



Abbildung 18: Vierradelektrode

Bei der Entwicklung der Differenzpotentialfeldmessung wurden nacheinander unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zunächst wurde der Einsatz des Canin+ verfolgt. Das Canin+ ist das zur Basisausstattung der Vierradelektrode gehörende Anzeigergerät. Der Messbereich des Gerätes reicht von - 999 mV bis + 340 mV, bei einer Auflösung von 1 mV. Über die Datentransfer Hilfssoftware Hyper Terminal, können nach entsprechender Konfiguration der COM-Ports am Computer die Daten mittels eines USB 1.1 Serial Konverters über den seriellen Anschluss (RS 232) des Canin+ auf den Computer übertragen werden. Mithilfe der Proceq Software ProVista, können die Übertragenden Daten nun am Computer bearbeitet werden. Zur besseren Interpretation der gesammelten Daten bietet Pro Vista Funktionen zum Generieren von Graphen und Diagrammen.



Abbildung 20: Canin+ Anzeigergerät - Front



Abbildung 19: Canin+ Anzeigergerät - seitliche Anschlüsse

Bei dem zur Verfügung stehenden Canin+ handelt es sich um ein Gerät, welches im Zuge des BetoScan Projekts (Stoppel, 2011 [3]) ein Versions Update ( V6.0 BAM) erhielt. Der verbaute EPROM (engl. Abk. erasable programmable read-only memory) Speicherbaustein sieht die Ausgabe von Potentialwerten alle 0.5 s vor. Dies hätte bei höheren Geschwindigkeiten eine ungenügende Abtastrate zur Folge. Darüber hinaus erlaubt die Version nur den Betrieb einer einzelnen Radelektrode. Zwar standen bei der BAM noch weitere Canin+ Geräte ohne Versions Update zur Verfügung, die Ansteuerung der Vierradelektrode über Steuerungsbefehle erschien für die Errechnung des Differenzpotentials jedoch als zu starr. Daher wurde dieser Ansatz wieder verworfen.

Der zweite Ansatz bestand in der Idee, eine dem Canin+ nachempfundene Datenerfassung in Form einer elektrischen Schaltung zu realisieren. Dieser Aufbau bestünde aus einer Reihe elektronischer Bausteinen, wie Operationsverstärkern, Spannungswandlern, Widerständen und Optokopplern. Aufgrund seiner Komplexität und der Spezifikationen in Hinblick auf das Zusammenspiel mit den anderen elektronischen Bausteinen der Schaltung stand zunächst der Operationsverstärker im Zentrum der Überlegungen, hinsichtlich des Aufbaus sowie der Recherche der anderen Komponenten. Je nach interner Schaltlogik, können Operationsverstärker verschiedene Zwecke erfüllen. Da im Zuge dieser Arbeit die Potentialdifferenzen zwischen Radelektroden gemessen werden sollte, wurde ein Differenzverstärker benötigt. Diese messen den Spannungsunterschied zwischen zwei Eingängen und verstärken diesen. Um welchen Faktor verstärkt wird, richtet sich nach der Größe von Widerständen, welche an den dafür vorgesehenen PINs des Chips angeschlossen werden können. Die Wahl für den Operationsverstärker fiel auf den INA 116 gleichspannungs-Operationsverstärker von Texas Instruments. Dieser zeichnet sich durch einen extrem niedrigen Eingangsstrom von nur 100 fA aus. Da bei zu hohen Strömen die Elektroden oxidieren, muss der Stromfluss im System begrenzt werden. Hierzu sollten Potentiometer als einstellbare Widerstände eingesetzt werden. Weiterhin sollten Optokoppler eingesetzt werden um eine galvanische Trennung des Systems zu gewährleisten. Systeme ohne galvanische Trennung sind empfindlich gegenüber Störeinflüssen wie Kriechströmen. Diese können das System elektrostatisch aufladen und somit unter Umständen zu einer Abwanderung des Signals führen. Es zeigte sich schnell, dass die zu entwickelnde Schaltung relativ komplex sein würde. Bei der Wahl der elektronischen Bausteine muss darauf geachtet werden, ob diese hinsichtlich ihrer Spezifikationen miteinander kompatibel sind. Da es sich bei der Vierradelektrode um eine Sonderanfertigung für die BAM handelt, konnte Proceq keine Datenblätter zur Verfügung stellen. Dies führte zu Schwierigkeiten bei der Auswahl der richtigen Komponenten. Ein

weiteres Problem bei der Umsetzung einer eigenen Schaltung, wäre die Spannungsversorgung des INA166 gewesen. Der INA166 benötigt eine Betriebsspannung von 18 Volt. Da zur Spannungsversorgung am BetoScan Light nur zwei in Reihe geschaltete 12 Volt Bleigelakkus (also insgesamt 24 Volt) zur Verfügung standen und eine externe Spannungsquelle für den mobilen Einsatz des BetoScan Lights nicht sinnvoll gewesen wäre, hätten zudem noch Spannungswandler in den Aufbau mitaufgenommen werden müssen. Bei vier Radelektroden können insgesamt 5 unterschiedliche Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Elektroden gemessen werden. Daher wären insgesamt fünf Operationsverstärker mit zugehörigen Spannungswandlern und Potentiometern für den Aufbau der Schaltung nötig gewesen. Eine derart komplexe Schaltung wäre nicht nur teurer, sondern auch fehleranfälliger. Aus diesen Gründen wurde der Aufbau einer eigenen Schaltung zugunsten eines kommerziellen Datenerfassungssystems von National Instruments verworfen.

Eine Beschreibung des Gerätes findet sich bereits weiter oben unter Abschnitt 3.1.2 . Jedoch soll an dieser Stelle, auf Grundlage der Erfahrungen der vorherigen Ansätze, noch einmal kurz auf die Vorteile des DAQ speziell im Hinblick auf die Erfassung von Differenzpotentialen eingegangen werden. Mit einer Abtastrate von 250 kS/s arbeitet das DAQ im Vergleich zu dem Canin+ wesentlich schneller. So lässt sich auch bei zügiger Fahrt noch ein feines Messraster abbilden. Ein Operationsverstärker ist bereits im Gerät integriert. Außerdem verfügt es mit 16 Kanälen über genug Anschlüsse um fünf Differenzpotentiale zu ermitteln. Die Spannungsversorgung des integrierten Operationsverstärkers findet über den Computer statt, an dem das DAQ über eine USB Schnittstelle verbunden ist.

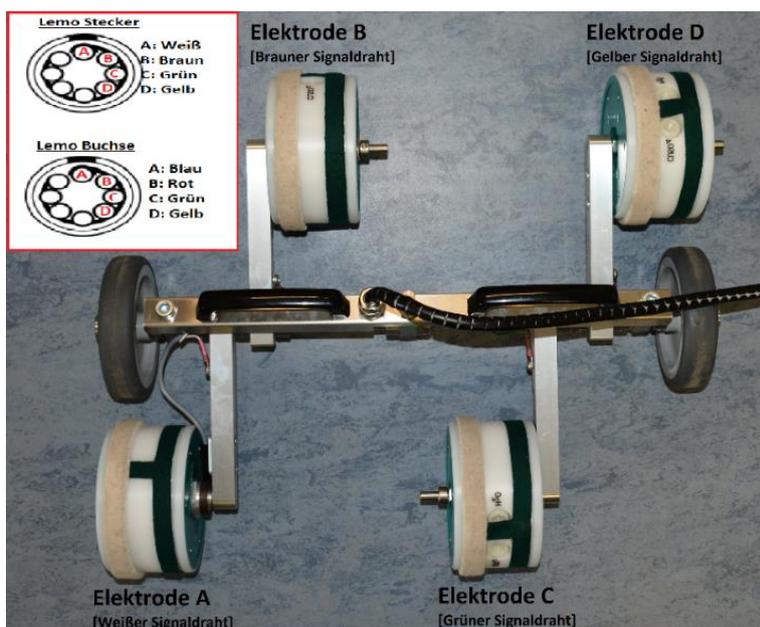


Abbildung 21 Anschlüsse der Vierradelektrode

Die Realisierung der Differenzpotentialfeldmessung erfolgte in mehreren Schritten. Der erste Schritt bestand in dem Anschluss der Vierradelektrode an das DAQ. Jede der Radelektroden besitzt einen Signaldraht. Die vier Signaldrähte sind über ein 2,5 m langes Signalgabel auf einem Lemo-Stecker aufgelegt. Um die einzelnen Drähte an das DAQ anzuschließen musste das

Signalkabel aufgeschlüsselt werden. Zu diesem Zweck, wurde die entsprechende Buchse (Typ:FGG.2B.308.CLAD62Z) zu dem Lemo- Stecker bestellt und verdrahtet. Die Belegung der einzelnen Kanäle ergibt sich dabei aus der gewünschten Schaltungsart. Hier stehen beim NI DAQ vier Verschiedene Optionen zur Auswahl, welche sich durch ihr jeweiliges Bezugspotential voneinander unterscheiden. Die bei der Entwicklung der Differenzpotentialfeldmessung verwendeten Schaltungsarten waren die differentielle- und die RSE (Referenced Single- Ended Mode) Schaltung. Bei differentieller Schaltung wird der Spannungsunterschied zwischen zwei belegten Kanälen gemessen, also die Spannung zwischen je zwei angelegten Elektroden. Bei der RSE Schaltung wird ein Potential gegenüber eines Bezugspotentials gemessen, also den jeweiligen angelegten Elektroden in Bezug zu dem in diesem Fall angelegten Bewehrungsanschluss.

Um die gemessenen Daten in LabVIEW zu verarbeiten, mussten zunächst die einzelnen Kanäle Konfiguriert werden. Die Konfigurierung wurde mit dem DAQ- Assistenten (Siehe Abschnitt 3.1.3) durchgeführt. Dieser Assistent bündelt zahlreiche Möglichkeiten des Measurement & Automation Explorers für die Konfiguration von Messgeräten in NI- DAQmx-Tasks.

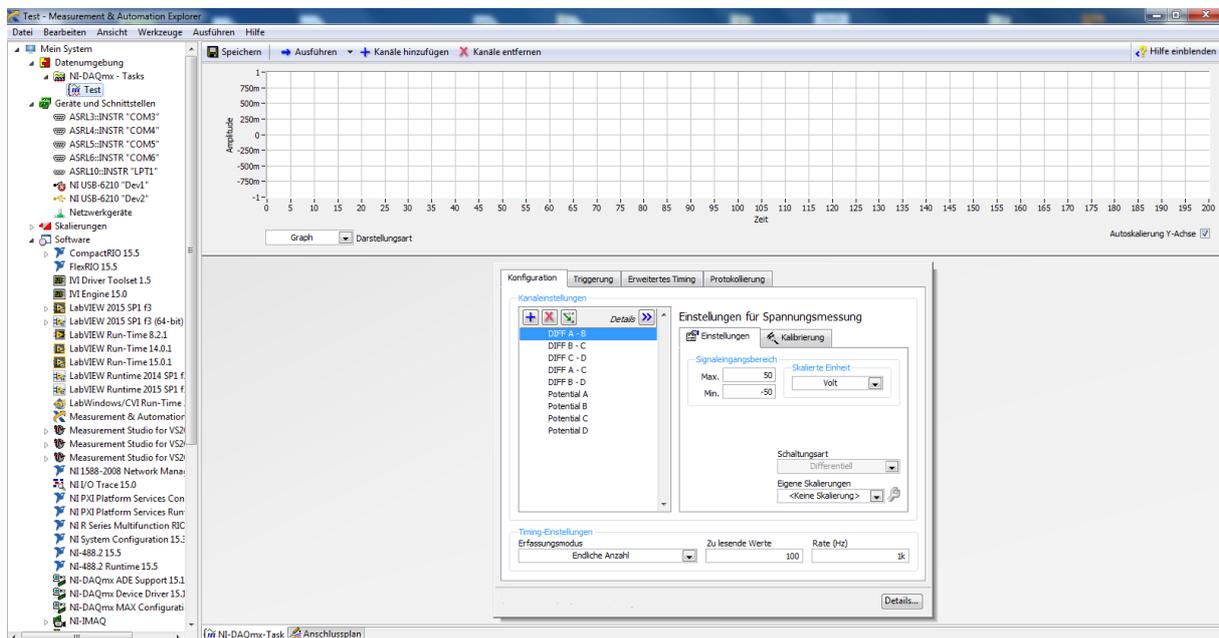


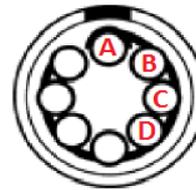
Abbildung 22: Taskkonfigurierung mittels des Measurement & Automation Explorers

So können Kanäle individuell zu Tasks zusammengefasst und deren Konfiguration für späteren Gebrauch gespeichert werden. Bei der Auswahl neuer Kanäle zu einem Task, kann man zunächst verschiedene Optionen hinsichtlich der zu erfassenden Messgrößen treffen. Neben der Spannungsmessung stehen noch Optionen für weitere Messungen wie Strom, Widerstand, Frequenzen, Schalldrücke und viele mehr zur Auswahl.

Je nach Auswahl stehen im folgenden verschiedene Optionen zur Konfiguration zur Verfügung. Im Falle der Spannungsmessung die weiter oben angesprochenen Einstellungen zur Schaltungsart, den zu erwartenden Signalbereich, Einstellungen zur Abtastrate und viele weitere. All diese Einstellungen können auch direkt im LabVIEW Code vorgenommen werden. Allerdings ist es komfortabler und bei großen Programmen wesentlich übersichtlicher diese Einstellungen im Assistenten auszuführen. Nach vorgenommenen Konfiguration bündelt der Assistenten sämtliche Einstellungen in einem grafischen Icon. Dieses kann später bei Bedarf jederzeit wieder geöffnet werden um Veränderungen oder Ergänzungen an den Kanaleinstellungen vorzunehmen. Ein weiterer Vorteil der Tasks besteht in der Möglichkeit, unterschiedlich viele Messgrößen in einem übergeordneten Task zusammenfassen zu können. Dies ist speziell in Hinblick auf kombinierte Messsysteme sehr praktisch, da die Tasks einen guten Überblick bei einer großen Palette an Einstellungsmöglichkeiten gewährleisten. Darüber hinaus können später jederzeit weitere Kanäle hinzugefügt oder entfernt werden, ohne hierbei getroffene Einstellungen anderer Kanäle des Tasks zu beeinflussen. Auf diese Weise konnten die Testmessungen mit und ohne Bewehrungsanschluss einfach gegenübergestellt und miteinander verglichen werden, ohne hierfür sämtliche Kanäle neu Verdrähten zu müssen. Die hierbei vom Gerät erfassten analogen Signale können in einem Graphen direkt angezeigt werden. Dabei ist es auch möglich verschiedene Kanäle auf demselben Graphen darzustellen und so schnell miteinander zu vergleichen. Aufgrund der zum Teil unterschiedlichen Messbereiche, war es für Vergleichszwecke meistens übersichtlicher die Daten in LabVIEW mittels skalierbarer Graphen zu visualisieren.

Nach der Verdrahtung und der Konfiguration der Kanäle wurde ein erstes LabVIEW Testprogramm geschrieben. Dieses Programm diente zunächst nur der Evaluation der Datenerfassung. Hierzu wurden die Signalkabel der einzelnen Radelektroden im RSE- Anschlussmodus in Bezug zu einem Bewehrungsanschluss gemessen. Der zweite Schritt bestand darin, das Differenzpotential zwischen je zwei der Elektroden zu messen. Hierbei wurden die Differenzen der gemessenen Elektrodenpotentiale über LabVIEW zunächst rechnerisch ermittelt. Die einzelnen Elektrodenpotentiale wurden dazu im RSE- Anschlussmodus mit Bewehrungsanschluss gemessen. Um die Differenzpotentiale der Elektroden untereinander messen zu können, musste zunächst die Verschaltung des DAQ von der RSE Schaltung auf die differentielle Schaltung umgestellt werden. Hierzu wurden die Anschlüsse am DAQ umgelegt und das Programm auf den differentiellen Schaltungsmodus konfiguriert. Die hierbei gemessenen Differenzpotentiale konnten daraufhin mit den zuvor rechnerisch ermittelten Differenzpotentialen, welche mit Bewehrungsanschluss gemessen wurden, verifiziert werden.

### Lemo Buchse



- A: Blau
- B: Rot
- C: Grün
- D: Gelb

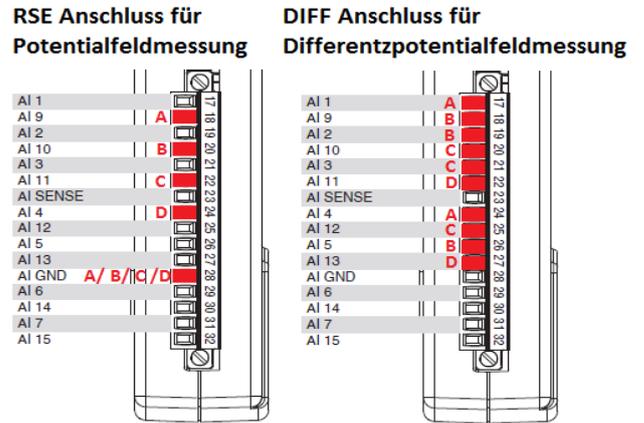


Abbildung 24: DAQ Kanalbelegung im RSE- und DIFF- Mode

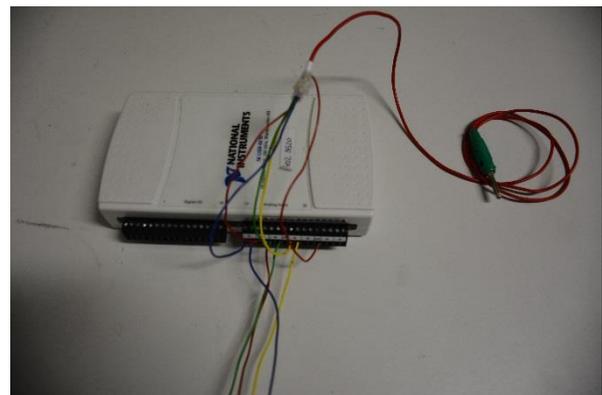


Abbildung 23: Verkabelung des DAQ im RSE- Modus



Abbildung 25: Verkabelung des DAQ im DIFF- Modus

Im letzten Schritt wurden die Potentialgradienten ermittelt. Um aus den Differenzpotentialen auf die Potentialgradienten schließen zu können, müssen die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten bekannt sein (Siehe Kapitel 4). Für die räumliche Erfassung der Messergebnisse wurden Tupel aus den gemessenen Differenzspannungen und der zurückgelegten Wegstrecke gebildet und im Excel Format abgespeichert. Die abschließende Integration der Datentupel wird gesondert anhand eines Matlab- Scripts durchgeführt und ist nicht mehr Teil der Entwicklung.

## 4 Evaluation und Ergebnisse

Die Test- und Vergleichsmessungen, wurden an einem der BAM Probekörper durchgeführt. Der verwendete Probekörper ist ein 120 x 120 cm großer Betonblock mit eingebettetem Bewehrungsstahl. An einer Seitenfläche des Körpers befinden sich eingelassene Kabel. Über diese Kabel werden mit einem Potentiostaten Spannungen generiert, die ein Potentialfeld simulieren. Je nach verwendeter

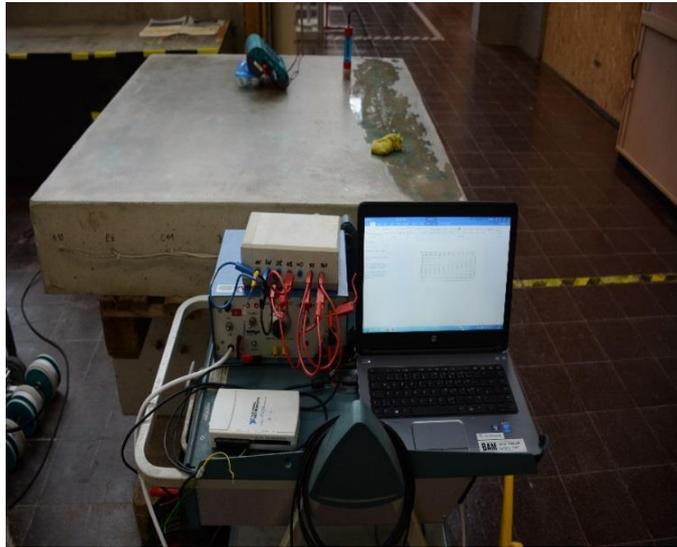


Abbildung 26: Potentiostat und Probekörper

Referenzelektrode wird der zu prüfende Abschnitt entlang eines Gitters (Stabelektrode) bzw. einer Linie (Radelektrode) durchgemessen. Hierdurch erhält man die räumliche Verteilung der einzelnen Korrosionspotentiale (*Potentialfeld*).

Wie bereits im Unterkapitel 2.4 beschrieben, hat die Betonfeuchte ebenfalls einen großen Einfluss auf den elektrolytischen Betonwiderstand. Umso trockener der Beton ist, desto größer ist sein elektrischer Widerstand. Um Differenzpotentiale messen zu können ist eine gute galvanische Kopplung zwischen Referenzelektrode und



Abbildung 27: Zwecks Vorwässerung abgedeckter Probekörper

Betonoberfläche unabdingbar. Dies wird durch eine der Messung vorangehende Vorwässerung der Prüffläche gewährleistet. Trockene Messoberflächen sind hierbei zunächst sehr absorptionsfähig. Daher musste der Probekörper mehrfach über längere Zeiträume nachgewässert werden. Mit steigender Bauteilfeuchte nehmen die gemessenen Potentiale anfangs rapide und bei voranschreitender Sättigung der Prüffläche immer langsamer ab. Die gemessenen Potentiale gelten als stabil, sobald der Unterschied zwischen zwei Messungen innerhalb eines einminütigen Messintervalls nicht größer als 4 mV ist.

Um bei den Messungen mit der Vierradelektrode korrekte Ergebnisse zu erhalten, muss zudem sichergestellt sein, dass die in der Elektrode befindliche Kupfersulfatlösung ( $\text{CuSO}_4$ ) gesättigt ist. Die Kupfersulfatlösung dient als Elektrolyt für die als Scheibe ausgeformte Kupferelektrode. Wenn die Lösung nicht gesättigt ist, kann die Elektrode kein konstantes Potential mehr aufrechterhalten. Dies verfälscht die Messungen. Zum Ansetzen der Lösung sind je Radelektrode 110 ml destilliertes Wasser und ca. 44 g  $\text{CuSO}_4$  nötig. Rein rechnerisch reichen weniger als 44 g  $\text{CuSO}_4$ . Aber da die Konzentration an  $\text{CuSO}_4$  in der Lösung mit der Zeit abnimmt, ist es empfehlenswert diese beim Ansetzen schon etwas zu übersättigen. Um alle Elektrodenlösungen anzusetzen, sind insgesamt rund 225 g an  $\text{CuSO}_4$  nötig. Da nicht genug  $\text{CuSO}_4$  vorrätig war, wurde neues  $\text{CuSO}_4$  in Form von Kupfersulfat Pentahydrat nachbestellt.



Abbildung 28: Geöffnete Radelektrode

Die ersten Testmessungen der Vierradelektrode sollten zunächst die korrekte Verkabelung und Konfiguration der Datenerfassung bestätigen. Hierzu wurden Messungen mit dem Canin+ und einer Stabelektrode bei Bewehrungsanschluss vorgenommen. Als nächstes wurden die Elektrodenpotentiale der Vierradelektrode in Bezug zur Bewehrung gemessen. Anschließend wurden die Messdaten verglichen. Hierbei wichen die Ergebnisse mitunter ein wenig voneinander ab. Die Abweichung war hierbei allerdings nie größer  $\pm 10$  mV. Da die Ergebnisse von Potentialfeldmessungen stark von Umgebungseinflüssen, wie etwa der Betonteilfeuchte abhängen, sind gewisse Schwankungen normal. Die ersten Messergebnisse kurz nacheinander durchgeführter Messungen mittels Stabelektrode betrug anfänglich noch ein Vielfaches von 10 mV. Abweichungen  $\leq 10$  mV liegen somit im Toleranzbereich.

Durch den Vergleich der Messungen konnte die korrekte Verkabelung und Konfiguration der Datenerfassung bestätigt werden. Somit war die Potentialfeldmessung mittels Vierradelektrode und Computer möglich.

Im nächsten Schritt wurde die korrekte Bildung der Differenzpotentiale überprüft. Hierzu wurden diese einmal rechnerisch mittels LabVIEW ermittelt und einmal direkt als Differenzpotential über das DAQ gemessen. Bei den rechnerisch ermittelten Differenzpotentialen handelte es sich um die Differenz der bei Bewehrungsanschluss gemessenen absoluten Potentiale. Um die Differenzpotentiale direkt zu messen, musste das DAQ neu verdrahtet werden (Siehe 3.2). Da das DAQ nicht über genug Kanäle verfügte,

mussten die Messungen abwechselnd durchgeführt werden. Die Unterschiede zwischen errechneten Differenzpotentialen und den direkt über das DAQ gemessenen Differenzpotentialen waren im Schnitt  $\leq 10$  mV. Die bei den Messungen vereinzelt auftretenden Ausreißer waren immer  $\leq 20$  mV. Da sich der Fehlerbereich bei zwei Elektroden um den Faktor zwei vergrößert hatte, wurden die Konfigurationen des DAQ Assistenten überprüft. Bei bisheriger Konfiguration erfasste das DAQ bei einer Abtastrate von 1000 Hz kontinuierlich Daten. Die einzelnen Daten wiesen hierbei eine gewisse Streuung auf. Bei den Testmessungen zur Potentialfeldmessung wurden nur absolute Potentiale einzelner Elektroden zur Bewehrung gemessen. Die Schwankungsbreite bei der Datenerfassung bewegte sich hier im Bereich von  $\leq 10$  mV. Da bei der Differenzpotentialmessung jedoch zwei absolute Potentiale gemessen werden, können die Abweichungen unter Umständen doppelt so groß ausfallen. Das Problem konnte durch eine bessere Konfiguration des DAQ sowie einer Mittelwertbildung gelöst werden. Nach neuer Konfiguration nimmt das DAQ nur eine endliche Anzahl (100 Messwerte bei einer Abtastrate von 1000 Hz) an Messungen vor. Nach Messung der 100 Datenwerte, wird in LabVIEW noch eine Mittelwertbildung vorgenommen.

Nachdem die korrekte Erfassung der Differenzpotentiale mittels DAQ durch den Vergleich mit den errechneten Differenzpotentialen bestätigt werden konnte, wurden im nächsten Schritt Testmessungen zur Erfassung der Potentialgradienten durchgeführt. Die hierbei gemessenen Daten sollten tabellarisch erfasst und später über ein Matlab- Script integriert werden. Die Ergebnisse der Integration sollten schließlich mit parallel durchgeführten Messungen durch die Stabelektrode abgeglichen werden. Hierzu mussten die Differenzpotentiale in Bezug zur Wegstrecke gemessen werden. Für die abschließende Analyse nach Integration der Messdaten, ist es wichtig über die gesamte Prüfstrecke möglichst äquidistante Messpunkte zu erhalten. Um dies zu realisieren wurde zunächst versucht die Erfassung der Differenzpotentiale durch LabVIEW Schleifenstrukturen zu steuern. Hierbei führte die Mittelwertbildung der erfassten Signale, sowie die Dateischreibeoperationen zu einem performance- Abfall der gesamten Datenerfassung. Daraus resultierten Probleme bei der Synchronisation von Daten- und Wegstreckenerfassung. In der Folge waren die erzeugten Datentupel hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit unzureichend.

Eine verbesserte Synchronisation wurde dadurch erreicht, die Datenerfassung direkt durch die vom Wegmesser erfassten Digitalflanken zu triggern. Diese Trigger, konnten über den DAQ-Assistenten für die entsprechenden Datenerfassungstasks konfiguriert werden. Auf diese Weise wurden für jedes ausgegebene Digitalsignal des Wegstreckenmessers die

Differenzpotentialmessungen der Elektrodenpaare einmal ausgeführt. Die Performanceprobleme der Datenerfassung konnten durch die Auslagerung der Schreibeoperationen behoben werden. Hierzu wurden außerhalb der Hauptschleife Arrays für die Messdaten der Differenzpotentialmessungen und der zurückgelegten Wegstrecke in cm initialisiert. Die Arrays wurden innerhalb der Hauptschleife sukzessive gefüllt. Nach Beendigung des Programmes werden die Arrays verknüpft und in Form einer Excell Tabelle abgespeichert.

Im Anschluss daran wurde der Probekörper vermessen und in 15 Messspuren eingeteilt. Es wurden im Anschluss zwei Testreihen mit verschiedenen Elektroden- Setups durchgeführt.

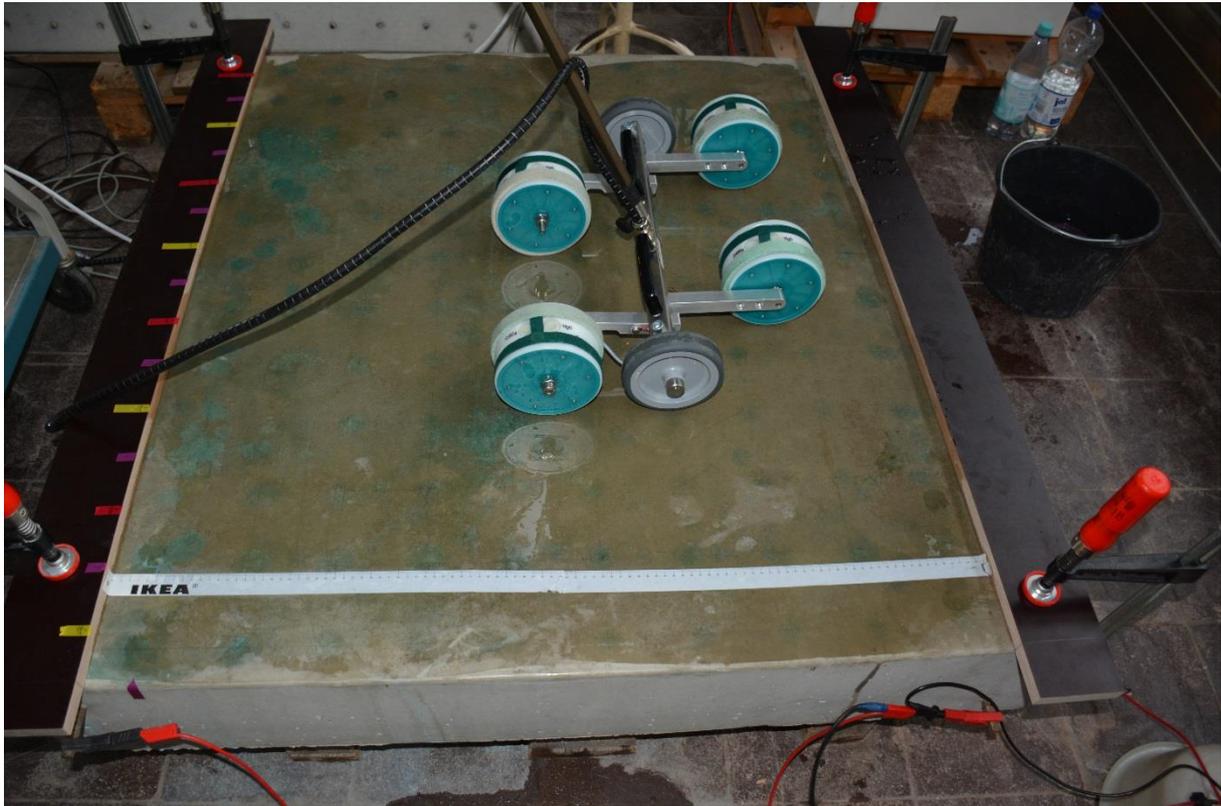


Abbildung 31: Probekörper mit Markierungen für Messspuren

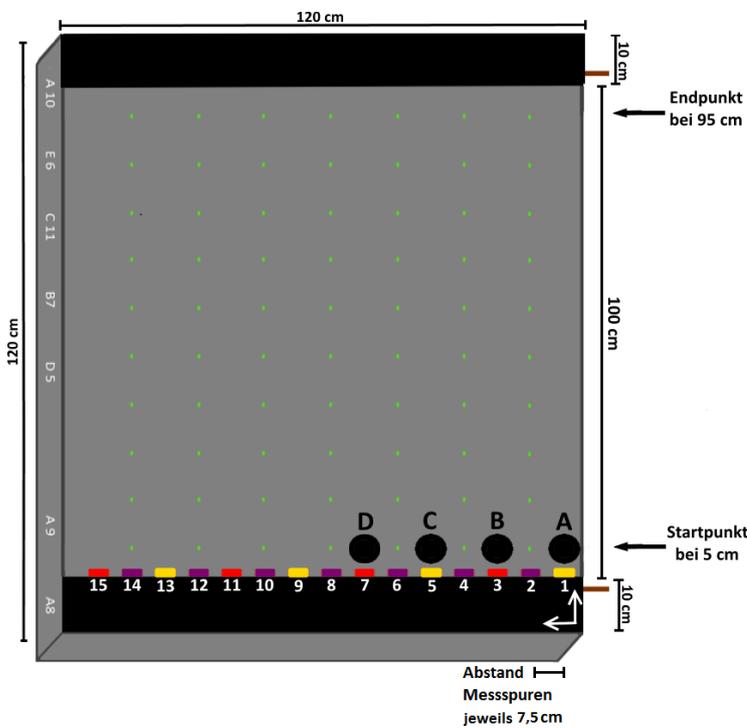


Abbildung 30: Aufbau für den ersten Testlauf

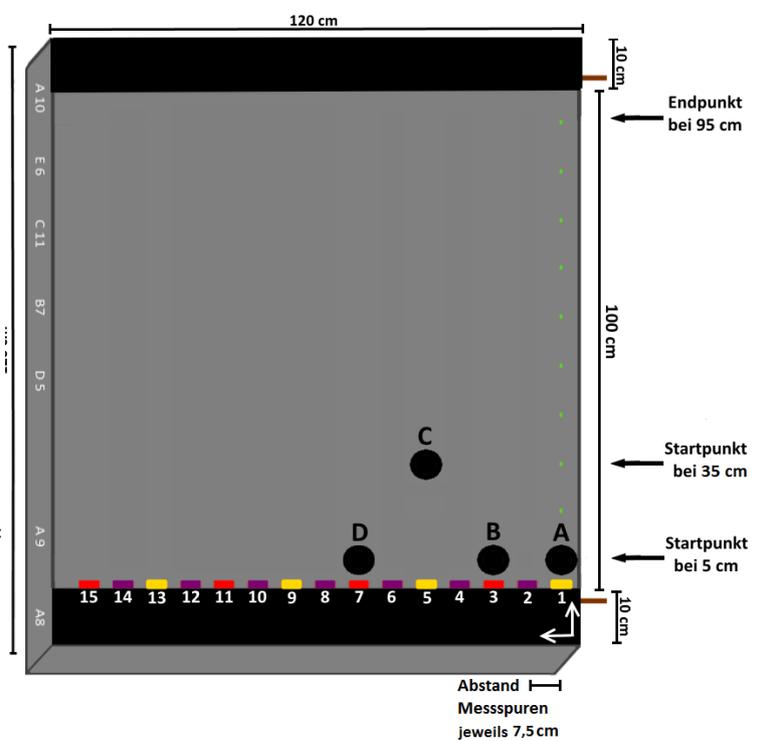


Abbildung 29: Aufbau für den zweiten Testlauf

In der ersten Testreihe wurde zunächst das normale Elektroden- Setup getestet. Hierbei sind die einzelnen Elektroden parallel zueinander angeordnet. Bei der ersten Testreihe wurden nacheinander fünf Testdurchläufe mit jeweils drei Differenzmessungen (A- B, B- C und C- D) durchgeführt. Nach jedem Testdurchlauf wurde die Vierradelektrode um zwei Spuren nach links versetzt. Vor den Messungen wurden auf jeder geraden Spur alle 10 cm Vergleichsmessungen mit der Stabelektrode vorgenommen.

Die bei den Testläufen erfassten Datentupel aus Differenzpotentialen und Wegstrecke wurden mit jeder steigenden Flanke (das entspricht einem Abstand von je 6,8 mm) des Wegaufnehmers gebildet. Diese waren über die Messtrecke hinweg relativ stabil. Aus noch nicht näher bekannten Gründen (Evtl. Rundungsfehler oder Störungen in der Synchronisation) kam es allerdings in manchen Testläufen immer noch zu Abweichungen von 1- 2 Flanken. Bei kurzen Strecken fällt der Fehler nicht weiter ins Gewicht. Auf längeren Strecken würde sich der Fehler allerdings aufsummieren. Die Datensätze korrespondierende Spuren (z.B. B - C aus dem ersten Durchlauf und A - B aus dem zweiten Durchlauf) sollten übereinstimmen. Die auf diesen Spuren gemessenen Datensätze waren allerdings nicht vergleichbar.

In der zweiten Testreihe wurden die Elektroden dann entsprechend des Delta- Sonden- Setups (Siehe Abschnitt 2.5.2) angeordnet. In dieser Testreihe wurden nacheinander 9 Testdurchläufe mit jeweils drei Differenzmessungen (B- C, C- D und B- D) sowie einer Vergleichsmessung (Elektrode A) durchgeführt. Nach jedem Testdurchlauf wurde die Vierradelektrode um eine Spur nach links versetzt. Bei der Vergleichsmessung handelte es sich um die Messung des absoluten Potentials über einen Bewehrungsanschluss. Durch diese Anordnung mussten im Vergleich zur ersten Testreihe nur die Spur 1 mittels Stabelektrode durchgemessen werden.

Auch bei der Auswertung der zweiten Testreihe stimmten die Datentupel korrespondierender Spuren nicht miteinander überein. Um das Problem zu lösen wurde eine Kalibrierung des DAQ durchgeführt und die Kupfersulfatlösungen der Elektroden neu angesetzt. Darüber hinaus wurde die Verkabelung des DAQ und der Anschlüsse sowie die zugrundeliegenden LabVIEW Codes überprüft. Das Problem konnte jedoch bis zum Ende des Praktikums nicht mehr behoben werden. Vermutlich liegt das Problem im Zusammenhang mit der Mittelwertbildung bei der Erfassung von äquidistanten Messpunkten. Die Generierung von zwei Tasks zur Erfassung der digitalen Flanken des Wegmessers könnte helfen ein feineres Messraster zu realisieren. Hierdurch könnten gleichzeitig die abfallenden sowie die ansteigenden Flanken erfasst und zur

Taktung der Differenzmessungen herangezogen werden. Darüber hinaus sollten die Rohdaten vor der Bildung des Mittelwerts näher analysiert werden. Durch die Betrachtung der Samples vor Bildung des Mittelwertes könnten Rückschlüsse auf mögliche Fehler bei der Datenerfassung gezogen werden.

## 5. Fazit

Thema der Arbeit war die Entwicklung von Messtechnik zur Bestimmung der Betondeckung, des Elektrolytischen Betonwiderstandes und des Potentialfeldes mittels einer autonomen Messplattform. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Entwicklung eines zerstörungsfreien Systems zur Bewertung von Korrosionswahrscheinlichkeiten von Bewehrungsstahl mittels Potentialfeldmessung. Die Bestimmung der Betondeckung sowie des elektrolytischen Betonwiderstandes, sollte hierbei die Bewertung der Potentialfeldmessungen abrunden. Das zu entwickelnde Kombi- Messsystem sollte weiterhin dahingehend beschaffen sein, autonom Messungen vornehmen zu können. Daher wurden die einzelnen Messgeräte zur späteren Montage auf einer autonomen Messplattform, dem BetoScan Light, hin ausgewählt.

Im Zuge der Arbeit kam es zu Neubewertung einzelner Schwerpunkte des zu entwickelnden Messsystems. Neben den ursprünglich ins Auge gefassten Messkomponenten, wurde das System noch um eine Wegstreckenerfassung sowie einen Sensor zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte ergänzt. Außerdem zeigte sich, dass die parallele Erfassung des Elektrolytischen Betonwiderstandes und des Potentialfeldes nicht sinnvoll ist. Sofern die Messungen zeitgleich ausgeführt werden, beeinflusst die für die Potentialfeldmessung nötige Vorwässerung der Prüffläche, die Ergebnisse der Messung des Elektrolytischen Betonwiderstandes. Darüber hinaus, ist der elektrolytische Betonwiderstand stark von der Chloridkonzentration des Bauteils abhängig. Die Entnahme von Bohrkernen zur Bestimmung der Chloridkonzentration ist jedoch nicht zerstörungsfrei und lässt sich nur schwer automatisieren. Da der elektrolytische Betonwiderstand als Hilfsgröße zur Bestimmung der Bauteilfeuchte ermittelt werden sollte, wurde als alternativer Bestimmungsansatz der Bauteilfeuchte das Mikrowellen- Verfahren herangezogen. Die Befehlssätze des verwendeten Messensors beruhen auf einem proprietären Kommunikationsprotokoll. Daher konnten für die Sensoren keine LabVIEW Anwendungen wie für die anderen Messgeräte erstellt werden.

Ein Kriterium des zu entwickelnden Kombi- Messsystems lag auf der zerstörungsfreien Messung der einzelnen Messgrößen. Da die klassische Potentialfeldmessung auf einen Anschluss an die Bewehrung angewiesen ist, handelt es sich hierbei zwar um einen zerstörungsarmen, jedoch keinen komplett zerstörungsfreien Ansatz zur Bestimmung von Bewehrungsstahlkorrosionen. Da ein Bewehrungsanschluss weiterhin die Reichweite des BetoScan Light eingeschränkt hätte, wurde der neue Schwerpunkt auf die Entwicklung einer Differenzpotentialfeldmessung gelegt. Dieses auf demselben Messprinzip beruhende Verfahren

ist eng mit dem der klassischen Potentialfeldmessung verwandt, kommt im Gegensatz hierzu allerdings ohne Bewehrungsanschluss aus.

Daher wurde das bereits umgesetzte System zur Potentialfeldmessung schrittweise zur Differenzpotentialfeldmessung weiterentwickelt. Bei abschließenden Testmessungen des Systems gelang es hierbei jedoch nicht eindeutige Rückschlüsse auf das Potentialfeld zu ziehen. Allerdings konnten wichtige Punkte auf dem Weg zu einer automatisierten Differenzpotentialfeldmessung umgesetzt und in Testmessungen bestätigt werden. Dazu zählen die Messung von Differenzpotentialen mittels Datenerfassungsgerät (NI USB-6210) und deren Ortsreferenzierung. Dies sind wichtige Grundlagen für die Entwicklung einer automatisierten Differenzpotentialfeldmessung. Die nächsten Schritte hierzu beständen in der Optimierung der Datenerfassung sowie der Integration der Potentialgradienten mittels LabVIEW.

## Literaturverzeichnis

- [1] Luley, H., Kampen, R., Kind-Barkauskas, F., Klose, N. und Tegelaar, R. (1997). Instandsetzen von Stahlbetonoberflächen. Ein Leitfaden für den Auftraggeber. 7. Auflage, Düsseldorf, Beton-Verlag GmbH.
- [2] Hauke, M. (2016). Autonomes mobiles Scanner-System zur zerstörungsfreien Prüfung von Stahlbeton. Bachelorarbeit, Berlin, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, (unveröffentlicht).
- [3] Stoppel, M. (2011). Differenzpotentialfeldmessung in der automatisierten Prüfung von Stahlbetonteilen. Dissertationsreihe Band 75, Berlin, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.
- [4] Reichling, M. und Raupach, M. (2011). Kabellose Potentialfeldmessung an Stahlbetonteilen. In: Fakultät für Bauingenieurwesen (2011). Kurzberichte des Instituts für Bauforschung 24. Aachen, RWTH Aachen und Institut für Bauforschung Aachen.
- [5] Fluge, F. (2001). Marine Chlorides. A Probabilistic Approach to Derive Provisions for EN 206-1. In: Third Workshop on Service Life Design of Concrete Structures. From Theory to Standardisation. Tromsø, DuraNet (S. 63-83).
- [6] National Instruments Corporation (2017). Was ist Datenerfassung? Verfügbar auf: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/d/> (aufgerufen am 12.09.2017).
- [7] Zilch, K., Rogge, A. und Ehmke, J. (2010). Bewehren von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045-1:2008-08. Sicherstellung der Dauerhaftigkeit. Arbeitsblatt 6, Ausgabe 12, Düsseldorf, Institut für Stahlbetonbewehrung e.V.
- [8] Büchler, M. und Schiegg, Y. (2007). Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten. Forschungsbericht im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Strassen, Zürich, SGK – Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz.
- [9] Flohrer, C. (1999a). Messung der Betondeckung und Ortung der Bewehrung. Fachtagung Bauwerksdiagnose, DGZFP Berichtsband, Jg. 66-CD, Vortrag 4.
- [10] Leschnik, W. (1999b). Feuchtemessung an Baustoffen. Zwischen Klassik und Moderne. Berichtsband, Berlin, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung.
- [11] HF Sensor GmbH (2017). Übersicht Feuchtemessung. Verfügbar auf: [hf-sensor.de](http://hf-sensor.de) (aufgerufen am 04.08.2017).
- [12] Sodeikat, C. (2010). Merkblatt B3. Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion. Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 105, Nr. 8, S. 529-538.
- [13] Lay, S., Rucker, P. und Brandes, C. (2007). Messprinzip von CANIN. Grundlagen für eine optimale Interpretation. Verfügbar auf: [www.concrete-concepts.eu](http://www.concrete-concepts.eu) (aufgerufen am 26.09.2017).
- [14] Dauberschmidt, I. C. und Vestner, S. (2010). Bauwerksdiagnose bei chloridbelastetem Beton. München, Ingenieurgesellschaft Prof. Dauberschmidt und Vestner mbH.

- [15] National Instruments Corporation (2017b). Was ist LabVIEW? Verfügbar auf: <http://www.ni.com/labview/d/> (aufgerufen am 11.09.2017).
- [16] National Instruments Corporation (2009). DAQ M Series NI USB-621x User Manual.
- [17] Baumer Electric AG (2017). Inkrementale Drehgeber. MDFK 08- Gegentakt. Verfügbar auf: <https://www.baumer.com/ch/de/produktubersicht/drehgeber-winkelsensoren/lagerlose-drehgeber/inkrementale-lagerlose-drehgeber/bis-150-mm-hohlwelle/mdfk-08---gegentakt/p/28108> (aufgerufen am 14.09.2017).
- [18] Honeywell International Inc. (2010). HIH- 5030/5031 Series. Low Voltage Humidity Sensors
- [19] Proceq Group (2017) Profometer und Profoscope. Betondeckungsmessgeräte und Bewehrungssucher. Verfügbar auf: [https://www.proceq.com/de/vergleichen/bewehrungssuche-und-betondeckungsmessung/?gclid=EAIaIQobChMIr\\_28vt3G1gIVhJUCh25PQb7EAAYASAAEgKzHPD\\_BwE](https://www.proceq.com/de/vergleichen/bewehrungssuche-und-betondeckungsmessung/?gclid=EAIaIQobChMIr_28vt3G1gIVhJUCh25PQb7EAAYASAAEgKzHPD_BwE) (aufgerufen am 22.07.2017).
- [20] National Instruments Corporation (2012) VISA-VIs und -Funktionen. Verfügbar auf: [http://zone.ni.com/reference/de-XX/help/371361J-0113/lvinstio/visa\\_lib\\_ref\\_func\\_descr/](http://zone.ni.com/reference/de-XX/help/371361J-0113/lvinstio/visa_lib_ref_func_descr/) (aufgerufen am 13.09.2017).