

**Differenzpotentialfeldmessung  
in der automatisierten Prüfung  
von Stahlbetonbauteilen**

**Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III  
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften  
der Universität des Saarlandes**

**von  
Dipl.-Ing. Markus Stoppel**

**Berlin**

Tag des Kolloquiums: 14. Juni 2011  
Dekan: Prof. Dr. Wilhelm F. Maier  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christian Boller  
Dir. u. Prof. Dr. Herbert Wiggerhauser  
Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre  
Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Joachim Schmitt

## Kurzfassung

---

Die Potentialfeldmessung ist eines der wichtigsten zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen. Mit dieser Methode kann eine ortsabhängige Wahrscheinlichkeit für aktive, chloridinduzierte Bewehrungskorrosion bestimmt werden. Bei der konventionellen Anwendung wird über ein langes Schleppkabel eine Verbindung zwischen einem Messgerät und der Bewehrung hergestellt.

Eine Interpretation der Messergebnisse wird anhand der absoluten Potentialwerte durchgeführt. Die Zuordnung zu aktiven oder passiven Zuständen der Bewehrung ist dabei nicht eindeutig. Eine zuverlässigere Methode der Bewertung des Korrosionspotentials ist jedoch die Bestimmung der Gradienten der Messspannungen.

Das vorrangige Ziel dieser Arbeit ist es, die Potentialfeldmessung zu einem vollkommen zerstörungsfreien Differenzpotentialfeldmessverfahren (DP-Messung) weiter zu entwickeln, mit dem die Potentialgradienten direkt gemessen werden und bei dem auf die permanente Ankoppelung an die Bewehrung verzichtet werden kann.

Die Arbeit fasst die Entwicklungsschritte zusammen und definiert die Bewertungskriterien für die DP-Messung, die die Qualität der Interpretation verbessern. Anhand der neu definierten Gradientenbreite wird aufgezeigt, wie die Detektionswahrscheinlichkeit für korrosionsaktive Bereiche erhöht wird.

Es wird gezeigt, wie die automatisierte Kombination des Verfahrens mit großflächigen Messungen des Feuchtegehalts und der Betondeckung zu einer zuverlässigeren Zustandsbewertung führt.

Stichworte:

Potentialfeldmessung, Gradient, Gradientenbreite, Differenzpotential, DP-Messung, Automatisierung, Beton, Kombination von Prüfverfahren, Multisensorik, Roboter, Stahlbeton, zerstörungsfreie Prüfung (ZfP), Zustandsermittlung

## Abstract

---

The half-cell potential test is one of the most important non-destructive testing techniques used for condition evaluation of reinforced concrete structures. This method gives the probability of chloride-induced corrosion in steel reinforcing rebars. The conventional approach involves exposing a rebar and using a long wire to connect the measurement device to the rebar.

An interpretation of the measurement results is carried out based on the absolute potential values. The assignment to active or passive states of the reinforcement is not unique. However, it has been recently found that the gradient of the measured potentials provides a more reliable assessment of the corrosion potential of reinforcements.

The primary objective of this work was to enhance the potential mapping technique by developing a difference potential mapping (DP-method), which can directly measure the potential gradients. Taking this new approach, a permanent connection to the rebar would be no longer required.

The work summarizes the development details and the assessment criteria for the DP-method, which improves the quality of interpretation. The newly defined gradient-width shows how the detection probability of corrosion-active areas is improved.

Moreover, it has been shown that combining the potential measurements with automated large-scale measuring the concrete cover and moisture content lead to a more reliable condition assessment.

### Keywords:

Half cell, gradient, gradient-width, potential difference, DP-method, automation, concrete, method combination, multi-sensor, robot, reinforced concrete, non destructive testing (NDT), condition assessment

# Inhalt

---

<b>1</b>	<b>AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung	3
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>5</b>
2.1	<b>Verbundwerkstoff Stahlbeton</b>	<b>5</b>
2.1.1	Schädigungsprozesse	6
2.1.1.1	Chloride im Stahlbeton	6
2.1.1.2	Karbonatisierung des Betons	8
2.1.1.3	Frost-Tau-Zyklen	9
2.1.2	Zustandsanalyse	9
2.1.2.1	Zustandsanalyse der Bewehrung	10
2.1.2.2	Zustandsanalyse des Betons	10
2.2	<b>Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) zur automatisierten Untersuchung von Stahlbetonflächen</b>	<b>12</b>
2.2.1	Potentialfeldmessung	13
2.2.2	Betondeckungsmessung mit dem Wirbelstromverfahren	15
2.2.3	Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren	17
2.2.4	Feuchtemessung mit Hilfe des Elektrolytischen Betonwiderstands	18
2.2.5	Messung von Umgebungsbedingungen	20
2.3	<b>Robotik und Automatisierung</b>	<b>21</b>
2.3.1	Allgemeines	21
2.3.2	InnoNet Projekt „BetoScan“	23
2.3.3	Positionsbestimmung	25
2.3.4	Ortsreferenzierte Multikanal-Messwerterfassung	28
<b>3</b>	<b>VON DER POTENTIALFELDMESSUNG ZUR DIFFERENZPOTENTIALFELDMESSUNG</b>	<b>31</b>
3.1	<b>Stand aktueller Forschung</b>	<b>32</b>
3.1.1	Potentialfeldmessung	32
3.1.2	Korrosionsdetektion mit anderen ZfP-Verfahren	38
3.2	<b>Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung)</b>	<b>40</b>
3.2.1	Betrachtung des Makroelements	40
3.2.2	Definition der Spannungstrichterbreite	43
3.2.3	Integration der Differenzpotentiale	44
3.2.4	Gradient der Differenzpotentiale	46
3.2.5	Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit durch die Differenzpotentialfeldmessung	48
3.2.6	Festlegung des Elektrodenabstands	51
3.3	<b>Messungen</b>	<b>55</b>
3.3.1	Vorversuch mit zweiter ortsfester Referenzelektrode	55
3.3.2	Vorversuch zur Differenzmessung	56

3.3.3	Versuch an einem Probekörper mit provozierter Korrosion durch Chloridkontamination und Stromeinprägung	57
<b>3.4</b>	<b>Grenzen des Verfahrens</b>	<b>62</b>
<b>4</b>	<b>WEITERENTWICKLUNG DER AUTOMATISIERUNG ZUR INTEGRATION DER DP-MESSUNG</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Mäander und Sensorpositionierung</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Messpunktabstände</b>	<b>67</b>
<b>4.3</b>	<b>Flächenleistung</b>	<b>69</b>
<b>4.4</b>	<b>Verfahrenskombination</b>	<b>73</b>
4.4.1	Messung der Betondeckung und Lokalisierung der Bewehrung mit Wirbelstrom und Radar	73
4.4.2	Messung der Potentialfeldverteilung unter Berücksichtigung der Bauteilfeuchte oder des elektrolytischen Betonwiderstands	74
<b>4.5</b>	<b>Vergleich mit Handmessungen</b>	<b>76</b>
<b>4.6</b>	<b>Messwertabweichungen und Aussagesicherheit</b>	<b>77</b>
4.6.1	Potentialfeldmessung und DP-Messung	77
4.6.2	Betondeckungsmessung mit dem Wirbelstromverfahren	79
4.6.3	Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren	80
4.6.4	Positionsbestimmung	80
<b>5</b>	<b>PRAKTISCHE ANWENDUNG</b>	<b>83</b>
<b>5.1</b>	<b>Anwendung 1: Großer Betonprobekörper (GBP) BAM</b>	<b>83</b>
5.1.1	Automatisierte Anwendung der DP-Messung	84
5.1.2	Betondeckung und Bauteilfeuchte	88
5.1.3	Luftfeuchte und Umgebungstemperatur	90
5.1.4	Wiederholgenauigkeit von Positionsmessungen	91
<b>5.2</b>	<b>Anwendung 2: Berliner Parkhaus</b>	<b>92</b>
5.2.1	Betondeckungsmessung	92
5.2.2	Feuchtemessung	94
5.2.3	Bauteildickenmessung	95
<b>5.3</b>	<b>Erfahrungen aus den praktischen Anwendungen</b>	<b>95</b>
5.3.1	Handhabung und Verfahrensabläufe	95
5.3.2	Bildgebende Darstellung	97
<b>6</b>	<b>DISKUSSION DER ERZIELTEN ERGEBNISSE UND FOLGERUNGEN</b>	<b>101</b>
<b>6.1</b>	<b>DP-Messung</b>	<b>101</b>
<b>6.2</b>	<b>Automatisierung</b>	<b>102</b>
<b>6.3</b>	<b>Praktische Anwendung</b>	<b>103</b>
<b>6.4</b>	<b>Vergleich zwischen Theorie und Anwendung</b>	<b>105</b>
<b>6.5</b>	<b>Empfehlungen für eine Messstrategie</b>	<b>107</b>

<b>7</b>	<b>SCHLUSSBETRACHTUNG</b>	<b>109</b>
7.1	Zusammenfassung	109
7.2	Ausblick	112
7.2.1	Weiterentwicklung der DP-Messung	112
7.2.2	Vorschläge für die weitere Automatisierung von Prüfverfahren	113
7.3	Epilog	115
<b>8</b>	<b>VERZEICHNISSE</b>	<b>117</b>
8.1	Literatur	117
8.2	Verwendete Formelzeichen und Symbole	126
8.3	Glossar	128
<b>9</b>	<b>ANHANG</b>	<b>131</b>
9.1	Allgemeines	131
9.2	Automatisierbare ZfP-Verfahren	137
9.2.1	Remanenzmagnetismus	137
9.2.2	Radar	139
9.2.3	Ultraschall	140
9.2.4	Impakt-Echo	143
9.2.5	Optische Verfahren	144
9.3	Nicht bzw. schwer automatisierbare ZfP-Verfahren	145
9.3.1	Infrarot-Thermografie	145
9.3.2	Radiografie	146
9.4	Zerstörungsarme und zerstörende Verfahren	148
9.4.1	Verfahren zur Bewertung von Oberflächenschutzsystemen	148
9.5	Anpassung und Erweiterung von Standardmessgeräten	151
9.5.1	Voruntersuchungen	152
9.5.2	Hardwareintegration	153
9.5.3	Softwareintegration und Datenübertragung	156
9.5.4	Messwertabweichungen und Aussagesicherheit	160
9.5.4.1	Radarmessung	160
9.5.4.2	Ultraschallmessung	161
9.5.5	Fazit zu Kapitel 9.5	162
9.6	Simulation eines automatisierten Multisensorik-Prüfablaufs	164
9.6.1	Aufbau einer Simulation	164
9.6.2	Durchführung von Simulationen	167
9.6.2.1	Funktionstests	167
9.6.2.2	Geschwindigkeits- und Lasttests	168
9.6.2.3	Langzeitversuche	169
9.6.2.4	Datenintegrität	170
9.6.3	Grenzen der Simulation	170
9.6.4	Fazit zu Kapitel 9.6	170



# 1

## Ausgangssituation und Zielsetzung

### 1.1 Ausgangssituation

Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken haben sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Wirtschaftszweig entwickelt.

Stahlbetonkonstruktionen sind Verbundbauteile, deren Standsicherheit und Dauerhaftigkeit nur durch das Zusammenwirken von Stahl und Beton gemäß den Regeln des Stahlbetonbaus sichergestellt ist. Aufgrund der Herstellung, Nutzung oder Exposition gegenüber betonschädigenden Medien können Beton- oder Stahlbetonbauwerke in ihrer visuellen Erscheinung oder Funktion beeinträchtigt sein und müssen saniert werden. Die am häufigsten anzutreffenden Schäden sind chlorid- und karbonatisierungsinduzierte Korrosion der Stahlbewehrung, die in rund 70% aller Fälle diagnostiziert werden [Gehlen2010].

Chloride werden vor allem durch die Verwendung von Tausalzen in Stahlbetonbauwerke eingebracht, beispielsweise durch Fahrzeuge in Parkhäuser. Im Staat New York (USA) werden jährlich 900.000 t Tausalze zur Enteisung von Straßen eingesetzt [Kelling2010]. In Deutschland werden durchschnittlich pro Winter 1.800.000 t Salze von den Winterdiensten ausgebracht [UBA2003]. Diese Größenordnungen machen deutlich, dass zumindest ein Teil dieser Mengen zur chloridinduzierten Schädigung von Stahlbetonkonstruktionen beiträgt. Auch Bauwerke, die stetig dem salzigen Milieu des Meerwassers ausgesetzt sind, weisen entsprechende Schäden auf [Fluge2001].

In Deutschland und anderen europäischen Ländern liegen derzeit die finanziellen Aufwendungen für Maßnahmen der Bauwerkserhaltung bereits über denen für Neubauwerke. Auch global ist dieser Trend zu beobachten: Die weltweiten Kosten für die Erhaltung durch Sanierung von Gebäuden werden auf über 20 Mrd. € pro Jahr und die für Brücken auf über 1 Mrd. € pro Jahr geschätzt [BundDZ1997].

Nach Angaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen müssen in den nächsten 10 Jahren allein 5.000 Ingenieurbauwerke aus dem Bundeseigentum instandgesetzt werden [Bund2003]. Neben den öffentlichen Verkehrsinfrastrukturbauwerken besteht ein großer Instandsetzungsbedarf im Bereich von (zumeist privatwirtschaftlich genutzten) Parkhäusern und Tiefgaragen. Bei geschätzten 2.000 öffentlichen und 4.000 privaten Parkdecks und Tiefgaragen alleine in Deutschland und bei einer durchschnittlichen Standzeit von 25 Jahren bis zur ersten Sanierung werden jährlich ca. 240 Parkhäuser mit insgesamt ca. 100.000 Einstellplätzen saniert werden müssen. Dies entspricht einer Betonfläche von jährlich ca. 3 Mio. m<sup>2</sup> allein bei Parkhausbauten. Wird davon ausgegangen, dass die mittleren Instandsetzungskosten von etwa 100 €/m<sup>2</sup> im Mittel durch eine genaue

Eingrenzung der geschädigten Bereiche um 10 % gesenkt werden können, ist ein Einsparpotenzial von 30 Mio. € pro Jahr vorhanden [BundDZ1997].

Europaweit summieren sich die Einsparmöglichkeiten durch eine genaue Lokalisierung von Schadstellen – zusammen mit den im außereuropäischen Ausland stärker als in Deutschland vorhandenen Korrosionsproblemen an Brücken – auf ca. 200 Mio. € jährlich.

Verkehrsbauwerke sind oft besonders widrigen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Dies gilt neben Brücken und Tunnelbauwerken besonders für Parkhäuser und –garagen. Zu einer hohen Chloridbelastung durch den Eintrag von Tausalzen, mechanischer Beanspruchung und Frost-Tauwechsel-Beanspruchung kommen gerade bei Bauwerken aus den 1970er und 1980er Jahren baulich bedingte Schwachstellen, wie zu geringe Betondeckung, unzureichende Entwässerungsvorrichtungen, fehlende Abdichtungen und schlecht an der Oberfläche nachbehandelter Beton hinzu. Erschwerend wirkt, dass nicht alle Schäden von außen erkennbar sind.

Um entscheiden zu können, ob eine bestehende Infrastruktur wirtschaftlich weitergenutzt werden kann, ist es erforderlich, den Zustand eines Bauwerks ganzheitlich zu betrachten und dessen Betriebslasten über den gesamten Lebenszyklus zu erfassen [Boller2009]. Die dafür notwendigen Werkzeuge stehen seitens der zerstörungsfreien Prüfung prinzipiell zur Verfügung. Jedoch ist es bisher oft nicht möglich, diese wirtschaftlich großflächig einzusetzen.

Die Übernahme von Bestandsobjekten birgt daher für einen potentiellen Käufer ein nicht unerhebliches finanzielles Risiko, wenn der Zustand des Objekts nicht durch detaillierte Bestandsaufnahme sicher genug eingeschätzt werden kann. Nur in den seltensten Fällen wird ein vollständig nach den anerkannten Regeln der Technik instand gesetztes Objekt verkauft. Baumängel, die bei der Inaugenscheinnahme durch bereits ausgeführte kosmetische Instandsetzungsarbeiten verdeckt werden, bleiben unerkannt und treten erst Jahre später zutage. Insbesondere Schäden durch chloridinduzierte Lochfraßkorrosion sind nicht sichtbar.

Um die notwendigen Mittel für eine dauerhafte Instandsetzung planen zu können, ist jedoch eine möglichst umfassende Zustandsbewertung des Bauwerks unabdingbar, die jedoch aus Kostengründen meist weder vom Verkäufer noch vom potentiellen Käufer beauftragt wird [Gieler2010].

Für solche Bauwerke muss der sachkundige Planer zusammen mit dem Bauherrn bei der Zustandserfassung und Sanierungsplanung wichtige Entscheidungen treffen. Lohnt eine Instandsetzung? Wenn ja, wie umfangreich muss sie sein, damit sie auch dauerhaft ist? Wie stark ist die Konstruktion geschädigt? Diese Fragen müssen zuverlässig beantwortet werden, um eine bedarfsgerechte Instandsetzung sicherzustellen. Hierzu sind ergänzende Untersuchungen erforderlich. In der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) hat sich für komplexe Verbundwerkstoffe wie Stahlbeton, dessen Untersuchung im Fokus dieser

Arbeit steht, gezeigt, dass oft eine Kombination von verschiedenen Prüfverfahren notwendig ist, um den Zustand eines Objektes hinreichend genau zu erkennen und eine detaillierte Schadensdiagnose erstellen zu können. Bestimmte Schäden können mit nur *einem* zerstörungsfreien Verfahren nicht sicher detektiert werden.

Deshalb werden an jedem Messpunkt eines festgelegten stichprobenartigen Messrasters am Bauwerk unterschiedliche Messwerte mithilfe von verschiedenen Verfahren aufgezeichnet.

Durch die Entwicklung eines großflächig und flächendeckend anwendbaren, schnellen und zuverlässigen Diagnosesystems kann eine Möglichkeit geschaffen werden, die Kosten für die Erhaltung solcher Bauwerke den Bedarf bezüglich Standsicherheit und Dauerhaftigkeit besser anzupassen. Diese Kosteneffizienz wird im Wesentlichen dadurch erreicht, dass durch die detaillierte, vollflächige Zustandserfassung bedarfsgerechte Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen für die in der Regel unterschiedlich stark geschädigten Oberflächenbereiche geplant und überwacht werden können. Hierzu müssen vorhandene und nicht sichtbare Schäden besser eingegrenzt werden können.

Mit herkömmlichen stichprobenartigen Untersuchungen ist eine vergleichbar gezielte Auswahl von Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen bei Weitem nicht möglich, so dass dieses erhebliche Einsparpotenzial bisher nicht genutzt werden kann. In der Praxis werden durch eine zu geringe Anzahl von Untersuchungen entweder nicht alle Schäden gefunden und entfernt, oder es wird großräumig (zu viel) instand gesetzt; beide Vorgehensweisen sind nicht bedarfsgerecht.

Die Potentialfeldmessung ist eines der am meisten genutzten zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Zustandsermittlung von Stahlbetonbauteilen, obwohl sie in vielen Fällen keine eindeutige Interpretation der Ergebnisse erlaubt. Mit diesem Verfahren wird lediglich eine Wahrscheinlichkeit für die Existenz aktiver, chloridinduzierter Bewehrungskorrosion bestimmt. Für die Anwendung des Verfahrens ist eine Ankopplung des Messgerätes über ein Schleppkabel an den Bewehrungsstahl herzustellen. Dabei ist eine punktuelle Zerstörung der Fläche in Kauf zu nehmen. Eine Verfahrenskombination mit anderen zerstörungsfreien Messverfahren wird bestenfalls stichprobenartig oder an Verdachtsstellen durchgeführt.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin die Detektion von Bereichen mit chloridinduzierter Bewehrungskorrosion in Stahlbetonbauteilen zu verbessern und eine flächendeckende Prüfung zu ermöglichen bzw. wirtschaftlich zu machen. Dazu wird ein neues Verfahren, die Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung), beschrieben. Dieses Verfahren kann vollständig zerstörungsfrei, d.h. ohne permanente Ankopplung an die Bewehrung, eingesetzt werden und eignet sich daher gut für eine automatisierte Anwendung.

Das konventionelle für die Korrosionsdetektion im Stahlbeton etablierte Messverfahren, die Potentialfeldmessung, unterliegt vielen Einflussfaktoren. Nur die Kenntnis weiterer Parameter wie der Betondeckung, des Feuchte- und der Chloridgehalts sowie weitere

ergänzende zerstörende Untersuchungen ermöglichen es dem erfahrenen Anwender durch Interpretation der Messergebnisse eine Bewertung des Bauwerkszustandes und das tatsächliche Vorhandensein aktiver Korrosion richtig einzuschätzen. Mithin liefert die Potentialfeldmessung weder Informationen über das Ausmaß an Korrosion, noch ist auszuschließen, dass kleine Anoden (d.h. aktive Korrosionsherde) bei einem groben Messraster übersehen werden. Eine automatisierte Datenerfassung ist wegen der erforderlichen Ankopplung mittels Schleppkabel an die Bewehrung mit der klassischen Potentialfeldmessung nur eingeschränkt möglich.

Es hat sich gezeigt [Steck2006], dass eine deutlich höhere Aussagesicherheit bei der Bewertung der Messergebnisse der Potentialfeldmessung erzielt werden kann, wenn eine anschließende Berechnung der Gradienten der Messspannungen durchgeführt wird. Demgegenüber werden bei der DP-Messung die Gradienten direkt gemessen.

Die Motivation für diese Arbeit liegt darin, die verfügbaren technischen Möglichkeiten die die Automatisierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen bietet, dafür zu nutzen, ein schnelleres und automatisierbares Verfahren zu entwickeln, mit dem das Auffinden aktiver Bewehrungskorrosion zuverlässiger wird.

Gleichzeitig kann durch die parallele, vollflächige Aufnahme von weiteren Messdaten die Aussagesicherheit der Zustandsbewertung erhöht werden, da diese Messwerte nicht nur stichpunktartig oder an Verdachtsstellen ermittelt werden. Prinzipiell ist auch eine manuelle Anwendung des Verfahrens möglich.

Diese Arbeit beschränkt sich im Bereich Automatisierung auf die Untersuchung von großen horizontalen Stahlbetonflächen. Beispielhaft wird auf die Umsetzung im Forschungsvorhaben [BetoScan] Bezug genommen.

Aufgrund der Größe der zu untersuchenden Bauwerke aus Stahlbeton (wie Brücken oder Parkhäuser) ist eine flächendeckende Untersuchung wirtschaftlich meist nur mit automatisierbaren Verfahren möglich. Vor allem der Zeitfaktor zur Prüfung von großen Flächen spielt eine nicht unerhebliche Rolle. Die Umsetzung dieses Prüf szenarios kann daher nur praktikabel mit einem automatisierten Multisensorsystem umgesetzt werden, das es ermöglicht, ortsreferenzierte Messdaten mit einer hohen Messpunktdichte, mit hoher Geschwindigkeit und mit gleichbleibender Qualität aufzunehmen. Als Hilfsmittel zur Automatisierung bieten sich autonome Robotersysteme an, die als kommerziell erhältliche Serviceroboter bereits mit eigenständiger Navigationstechnik ausgestattet sind. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es deshalb aufzuzeigen, mit welchen Methoden der Einsatz von Robotertechnik in Kombination mit automatisierten Prüfverfahren möglich ist und wie dadurch die Zuverlässigkeit der Prüfaussagen verbessert werden kann.

Mehr Messdaten erzeugen nur dann mehr Information, wenn sie richtig eingeordnet oder durch Kombination in richtiger Gewichtung mit anderen Verfahren in ihrer Aussagekraft verbessert werden.

# 2 Grundlagen

## 2.1 Verbundwerkstoff Stahlbeton

Beton ist ein Gemisch aus Zement, einer Gesteinskörnung, Wasser und Luftporen. Je nach Einsatzbereich variieren die Rezepturen beispielsweise durch die Zugabe von Zusatzstoffen, Betonzusatzmitteln oder die Auswahl der Korngröße des Zuschlags, um gezielt Eigenschaften des Betons wie Festigkeit, Gewicht, Elastizitätsmodul oder Querdehnzahl zu beeinflussen [Müller2009].

Da Beton im Vergleich zu seiner Druckfestigkeit eine Zugfestigkeit von etwa 10% besitzt, wird Beton in Verbindung mit Stahl als Verbundwerkstoff, dem sogenannten Stahlbeton, eingesetzt. Der Stahl übernimmt hierbei aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit die Aufgabe, die auf Zug beanspruchten Stellen eines Bauteils zu verstärken; man spricht in diesem Zusammenhang von Bewehrung. Abbildung 2-1 zeigt zwei Anwendungen.

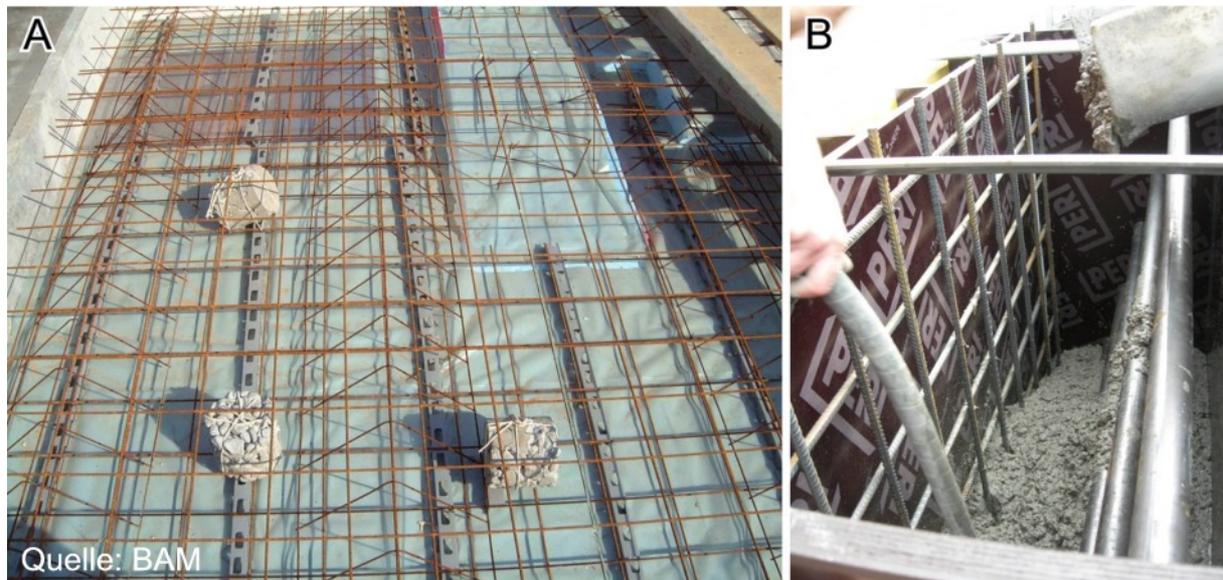


Abbildung 2-1 A: Bewehrungsmatten des großen Betonprobekörpers (GBP der BAM) mit unterschiedlichem Bewehrungsgehalt, Bauteildicken und künstlich eingebauten Fehlstellen vor der Betonage.  
B: Betonage eines Probekörpers mit Variation des Bewehrungsgehaltes und der Einbautiefen

Der Verbund zwischen Beton und Stahl entsteht durch die Haftung des Bindemittels Zement (Haftverbund), durch die Reibung zwischen Beton und Stahl (Reibungsverbund) und durch den durch die spezielle Formgebung (Rippung) des Betonstahls erzeugten Formschluss (Scherverbund). Ein großer Vorteil beider Werkstoffe ist, dass Beton und Stahl in etwa den gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, so dass durch Temperaturänderungen nur geringe Eigenspannungen im Verbund entstehen.

Eine weitere Variante des Stahlbetons ist der Spannbeton, bei dem durch Vorspannung mit hochfesten Spannstählen eine zusätzliche äußere Kraft in das Bauteil eingebracht wird. Auf die Untersuchung von Spannbeton wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Die Vielzahl weiterer Betonarten und Klassifikationen wird u.a. ausführlich in [Müller2009] beschrieben.

### 2.1.1 Schädigungsprozesse

Der Korrosionsschutz der Stähle ist in allen Fällen eine der wesentlichen Maßnahmen, die die Dauerhaftigkeit gewährleisten und das Bauteil vor Versagen schützen.

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton wird durch zahlreiche Einflussfaktoren herabgesetzt: Hervorzuheben sind dabei mechanische Beanspruchungen, **Frost-** und Taumittelbeanspruchungen (Eintrag von **Chloriden**) im Winter und die sogenannte **Karbonatisierung**.

#### 2.1.1.1 Chloride im Stahlbeton

Chloride gelangen sowohl beim Herstellungsprozess durch den Eigenchloridgehalt der Betonbestandteile als auch durch eine nachträgliche Chloridbelastung des Festbetons in das Bauteil (Fremdchlorid). In einem so belasteten Betongefüge können Eigen- und Fremdchloride gleichzeitig in verschiedener Form vorliegen:

- in chemisch gebundener Form,
- adsorptiv an die innere Oberfläche der Zementsteine physikalisch gebunden,
- als freie im Porenwasser gelöste Chloride.

Entscheidend für eine Schädigung des Bauteils durch chloridinduzierte Bewehrungskorrosion haben sich die im Porenwasser gelösten Fremdchloride herausgestellt [Schöppel2010]:

Dabei ist die Aufnahme von Fremdchlorid in den Beton umso größer, je höher der Kapillarporenanteil des Betons ist und je mehr Fehlstellen im Beton vorhanden sind.

Die Festlegung eines kritischen Chloridgehalts, der zu Korrosion führt, wird derzeit kontrovers diskutiert, aktuelle Untersuchungen hierzu finden sich beispielsweise in [Breit2007].

Beschädigte oder nicht vorhandene Abdichtungen der Oberfläche begünstigen den Eintrag von Feuchtigkeit und damit der Chloride. Dringt auch Sauerstoff bis zur Bewehrung vor, so sind die Chloride in der Lage, die im hochalkalischen Milieu vorhandene Passivschicht des Stahls zu durchbrechen. Der Stahl korrodiert, auch wenn der Beton nicht karbonatisiert ist [Schöppel2010]. Typisch für chloridinduzierte Korrosion ist der stellenweise tiefe, narbenartige Korrosionsabtrag, die sogenannte Lochfraßkorrosion. Durch diese Querschnittsschwächung entstehen an der Bewehrung weniger voluminöse Korrosionsprodukte als bei der Korrosion durch Karbonatisierung, so dass sich im Extremfall der Stahl

auch auflösen kann, ohne dass der Beton zerstört wird und die Schädigung somit nach außen nicht erkennbar wird.

Das Prinzip der Korrosion wird in Abbildung 2-2 verdeutlicht. An der Anode gehen Eisenionen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) unter Elektronenabgabe in Lösung. Die Elektronen bewegen sich durch den Stahl zur Kathode. Im umgebenden Beton, in dessen Poren sich Sauerstoff und Wasser befinden (müssen), bildet sich an der Kathode Hydroxid ( $\text{OH}^-$ ). Sind Anode und Kathode aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung (Zentimeter bis Meterbereich) unterscheidbar, so spricht man von einem **Makroelement** bzw. einer Makrozelle. Senkrecht zum Stromfluss zwischen Kathode und Anode bilden sich im Beton Äquipotentiallinien aus, deren räumliche Projektion an der Oberfläche als Potentialdifferenz (Gleichspannung) zum Bewehrungsstahl mit einem hochohmigen Voltmeter gemessen werden kann. Dieses Verfahren wird als Potentialfeldmessung bezeichnet und wird im Kapitel 2.2.1 ausführlich beschrieben.

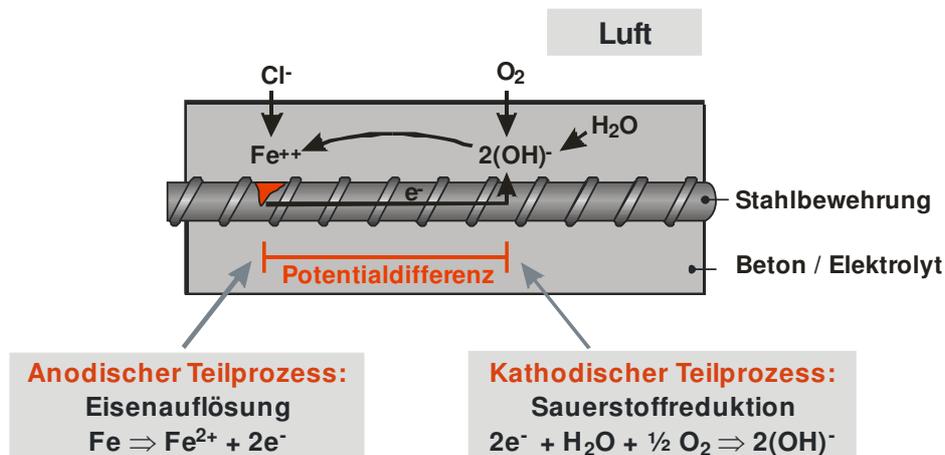


Abbildung 2-2 Schematische Darstellung der Korrosion von Bewehrungsstahl im Beton durch die Einwirkung von Chloriden [Dauberschmidt2010]

Im besonderen Maße sind die Fahrzeug-Standflächen in Parkhäusern durch Tausalze und den damit verbundenen starken Chlorideintrag gefährdet. Andere Faktoren wie zu geringe Betondeckung, hoher Feuchtigkeitsgehalt und mangelhafte Abdichtungen begünstigen die Korrosion zusätzlich.

Die Vielzahl an Untersuchungen und Forschungsarbeiten zum Thema chloridinduzierte Betonstahlkorrosion (beispielsweise [Broomfield2007], [Gulikers2005], [Harnisch2010], [Hunkeler2005], [Tuutti1982]) und dessen Modellierung zeigt den internationalen und weitreichenden Bedarf an diesem Thema.

Abbildung 2-3 zeigt eine Parkdeckoberfläche mit offenen Schäden durch Korrosion der Bewehrung.



Abbildung 2-3 Parkdeckoberfläche mit offenen Schäden durch Korrosion der Bewehrung.

### 2.1.1.2 Karbonatisierung des Betons

Als Karbonatisierung wird bei Beton die Umwandlung von Calciumhydroxid in Calciumcarbonat durch aus der Luft eindringendes Kohlendioxid bezeichnet.

Beton erhärtet auf Grund der chemischen Reaktion des Zements mit Wasser; dieser Vorgang wird als Hydratation bezeichnet. Das alkalische Milieu (pH-Wert im Bereich von 12 bis 14), das durch die Umwandlung von Kalkstein in Calciumhydroxid während der Hydratation des Betons entsteht, stellt im ungeschädigten Normalfall bei ausreichender Betonüberdeckung einen guten Korrosionsschutz für den Bewehrungsstahl dar. Dieser Schutz wird als Passivierung bezeichnet. Die Geschwindigkeit der Karbonatisierung, also das Fortschreiten der sogenannten Karbonatisierungsfront von der Betonoberfläche in das Bauteil hinein, hängt unter anderem vom Feuchtegehalt, der Druckfestigkeit, der Porosität und auch vom Alter des Betons ab [Schneck2005].

Sinkt aufgrund von äußeren Einflüssen wie Feuchte oder dem Eintrag von Chloriden der pH-Wert auf einen Wert unter 10, so kommt es zu einer Depassivierung, bei der sich die Oxidschicht um den Bewehrungsstahl auflöst, und der Stahl korrodiert. Stahl vergrößert bei dieser Art der Korrosion sein Volumen, so dass ein Druck auf den umgebenden Beton ausgeübt wird, der eine Rissbildung begünstigt. Größere Risse können wiederum den Korrosionsprozess weiter vorantreiben, wodurch letztendlich das Bauteil durch Abplatzungen der Oberfläche maximal geschädigt wird.

Für eine aktive Korrosion müssen zumindest sowohl Wasser als auch Sauerstoff vorhanden sein. Fehlt eine der beiden Komponenten, so findet auch in Anwesenheit von Elektrolyten und auftretenden Potentialdifferenzen keine Korrosion statt.

Kritisch sind vor allem Umgebungsbedingungen mit wechselnder Feuchte [Schneck2005]. Einerseits wird in feuchten Phasen die karbonatisierungsbedingte Korrosion begünstigt, andererseits ist in Phasen mit trockenem Beton die Chlorideindringung durch kapillares Saugen wesentlich intensiver als bei der Diffusion in feuchtem Beton.

Für die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe wird eine chemische Indikatorstechnik (Phenolphthaleintest) eingesetzt. Korrosion, die durch eine Karbonatisierung des Betons hervorgerufen wurde, kann nicht durch Potentialfeldmessungen detektiert werden [Schneck2005].

### 2.1.1.3 Frost-Tau-Zyklen

Das wiederholte Frieren und Tauen von Beton führt zu einer allmählichen Schwächung oder Zerstörung der Betonstruktur, sowohl oberflächlich als auch im Inneren. Durch gefrierendes Wasser in den Kapillarporen, dessen Volumen sich um bis zu 9% vergrößert, entstehen Mikrorisse, wodurch vor allem die Festigkeit und der E-Modul abnehmen [Strauss2009] bzw. sich andere mechanische Parameter ändern. Durch die Bildung der Mikrorisse wird die weitere Zuführung von Feuchtigkeit, Sauerstoff oder Chloriden in den Beton und damit die Korrosionsgefahr des Bewehrungsstahls begünstigt (vgl. Kapitel 2.1.1.1 und 2.1.1.2.)

**Fazit zu 2.1.1:** Stahl und Beton können durch äußere Einflüsse, die physikalische und chemische Prozesse auslösen, geschädigt werden. Das Zusammenspiel aller (vielfach variablen) Komponenten im Verbundwerkstoff Stahlbeton bedingt die Notwendigkeit für eine Zustandsanalyse den Zustand der Einzelkomponenten und des Verbunds kennen oder erfassen zu müssen.

### 2.1.2 Zustandsanalyse

Will man den Gesamtzustand eines Bauteils aus Stahlbeton bewerten, so kann man Stahl und Beton getrennt voneinander mit geeigneten Verfahren untersuchen. Für einen Materialverbund stellt sich jedoch schnell die Frage nach den Messgrößen, mit denen der Zustand des Gesamtsystems charakterisiert werden kann, und damit nach den internen (physikalischen wie chemischen) Prozessen, die durch das Zusammenwirken aller Komponenten ausgelöst werden. Die messtechnischen Grenzen sind hierbei allerdings fließend, da die Wirkungsweise eines Verfahrens meist von Eigenschaften mehrerer Komponenten abhängt.

Begrifflich unterscheidet man zwischen einer **Bestandserfassung** (z.B. Ermittlung der Bewehrungsdurchmesser oder Betonüberdeckung), der **Zustandsermittlung** (ist der Stahl korrodiert?) und der **Schadensdiagnose** (warum ist der Stahl korrodiert?). Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Bestandserfassung und der Zustandsermittlung.

### 2.1.2.1 Zustandsanalyse der Bewehrung

Die Bestandserfassung und Zustandsermittlung sind wichtige Maßnahmen zur Einschätzung der Resttragfähigkeit eines Bauteils.

Für die Erfassung des Bewehrungszustandes sind in erster Linie die Kenngrößen Lage, Bewehrungsdichte und Durchmesser der Bewehrungsstäbe sowie der Korrosionsstatus relevant. Sowohl in der Erkundung instand zu setzender Objekte als auch im Rahmen einer Qualitätsprüfung wird bei der Fertigungskontrolle die Überprüfung der Betonüberdeckung vorgenommen.

Als Betonüberdeckung (Kurzform: Betondeckung) wird der Abstand zwischen Betonoberfläche und der Oberkante der ersten Bewehrungsschicht bezeichnet. Mindestwerte der Betondeckung sind in der [DIN 1045-1/2001] bzw. in der 2. Berichtigung [DIN 1045-1/2005] für die Bemessung von Stahl- und Spannbetonbauten geregelt. Als Messverfahren eignen sich Radar, induktive Verfahren (MT) und Wirbelstrom (ET); mit letzterem kann zusätzlich der Stabdurchmesser bestimmt werden.

Die Korrosion von Stahl im Beton ist das mit Abstand größte Problem bei der Instandhaltung von Betonbauwerken. Mit konventionellen Untersuchungsmethoden, wie beispielsweise der visuellen Kontrolle und dem Abklopfen der Betonfläche, lassen sich Korrosionsschäden erst feststellen, wenn bereits Folgeschäden am Beton wie Risse, Abplatzungen oder Hohlstellen eingetreten sind.

Durch den Einsatz von elektrochemischen Prüfverfahren wie der Potentialfeldmessung in Kombination mit weiteren elektrischen zerstörungsfreien Verfahren und ggf. zerstörenden Untersuchungen können korrosionsaktive Bereiche eingegrenzt werden, die von außen noch nicht sichtbar sind.

### 2.1.2.2 Zustandsanalyse des Betons

Fehlstellen von Betonbauteilen lassen sich messtechnisch zerstörungsfrei ermitteln. Geometrische Eigenschaften (Dicke, Schichtaufbau) und weitere Materialkennwerte wie beispielsweise der Feuchtegehalt können mit zerstörungsfreien Prüfverfahren bestimmt werden. Die chemische Zusammensetzung kann jedoch meist nur durch zerstörende Messungen analysiert werden.

Der elektrolytische Betonwiderstand und die Feuchtigkeitsverteilung sind die wesentlichen zerstörungsfrei messbaren Einflussgrößen im oberflächennahen Bereich (Ausführungen hierzu im Kapitel 2.2).

Mit Hilfe der sogenannten Wenner-Methode (Vier-Elektroden-Anordnung nach Wenner) lässt sich der elektrolytische Betonwiderstand ermitteln. Der elektrische Widerstand ist maßgeblich von der Materialzusammensetzung, der Feuchte, dem Salzgehalt sowie der Bauteiltemperatur abhängig. Beispielsweise weist chloridhaltiger Beton einen viel tieferen spezifischen elektrischen Betonwiderstand auf als chloridfreier Beton.

Die Widerstandswerte können am jeweiligen Objekt für verschiedene Feuchtgehalte kalibriert werden, sie werden aber meist unkalibriert für eine rein qualitative Abschätzung der Bauteilfeuchte herangezogen.

Alternativ lässt sich die oberflächennahe Feuchtigkeit mit dem in Abschnitt 2.2.3 skizzierten Mikrowellenverfahren zur Feuchtemessung ermitteln.

Zur Bestimmung der Bauteildicke sowie zur Ortung von Hohllagen und Abplatzungen werden Verfahren wie Radar, Impakt-Echo und Ultraschall genutzt. Ausgenutzt wird hier, dass Reflexionen der Rückwand (bei der Bestimmung der Bauteildicke) bei Vorkommen einer Inhomogenität nicht mehr durchgängig erscheinen, da sie durch die Unregelmäßigkeiten stark gestreut oder gedämpft werden (Abschattung).

Die Oberflächentemperatur eines Bauteils kann beispielsweise durch Infrarotstrahlungsthermometer bestimmt werden. Diese Methode bietet neben einer berührungslosen Messung den Vorteil, dass die Messergebnisse nicht durch Wärmeableitung zum Messinstrument verfälscht werden können.

Der Karbonatisierungsgrad des Betons lässt sich zurzeit weder berührungslos noch zerstörungsfrei ermitteln. Die chemische Indikatorstechnik (Phenolphthaleintest) ist ein zerstörendes Verfahren zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe und kann nicht ohne erheblichen Aufwand automatisiert werden. Dieses stichprobenartige Verfahren ist vom Anwender manuell durchzuführen.

Der tiefenabhängige Chloridgehalt wird klassisch durch die nasschemische Analyse von sequentiell entnommenen Bohrkern- oder Bohrmehlproben bestimmt. Auch für das modernere Verfahren der Laserinduzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS), bei dem das durch einen Laser erzeugte Plasma spektroskopisch untersucht wird [Wilsch2008], werden Bohrkernproben benötigt; eine zerstörungsfreie tiefenabhängige Bestimmung des Chloridgehalts ist somit derzeit nicht möglich. Nur an der Oberfläche kann der Chloridgehalt quasi zerstörungsfrei mit diesem Verfahren bestimmt werden.

Die Druckfestigkeit von Beton wird klassisch durch zerstörende Druckversuche an bei der Herstellung gegossenen Betonwürfeln oder später entnommenen Betonzylindern im Labor ermittelt. Zerstörungsfrei lässt sich nur die oberflächennahe Druckfestigkeit mit dem Rückprallhammer ermitteln.

Bei diesem Verfahren wird die Rückprallenergie eines Schlagbolzens, der auf die Betonoberfläche geschleudert wurde, ermittelt und aus empirischen Messdaten unter Berücksichtigung von Unsicherheiten auf die Betonfestigkeit geschlossen.

Eine flächendeckende (automatisierte) Ermittlung der Betonfestigkeit ist nicht bekannt und erscheint innerhalb eines Bauwerks nicht unbedingt erforderlich. Tatsächlich kann aufgrund von Schwankungen der Qualität der eingesetzten Materialien in verschiedenen Bauabschnitten eine größere Streuung der Betonfestigkeit auftreten.

## 2.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) zur automatisierten Untersuchung von Stahlbetonflächen

Für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) werden verschiedene Messverfahren im Bauwesen angewendet, je nachdem, ob der Beton, die Stahlbewehrung, Inhomogenitäten im Verbund, Fehlstellen oder die Oberfläche untersucht werden sollen.

Aufgrund der zahlreichen Untersuchungsverfahren und möglichen Messparameter werden die Verfahren klassisch entweder nach ihrem Messprinzip (beispielsweise elektromagnetische, magnetische, akustische und andere Verfahren) oder nach dem zu untersuchenden Werkstoff eingeteilt [Taffe2008]. Eine weitere Einteilung nach dem Einsatzbereich über die Kategorien Erkundung (Schadensdiagnose) und Qualitätsprüfung von ausgeführten Arbeiten (Qualitätssicherung), die sich in der Zielrichtung und Ihrer Anwendbarkeit deutlich unterscheiden, ist ebenso möglich. So steht im Falle der Erkundung der Zustand der Bewehrung und des Betons im Vordergrund; für die Qualitätssicherung von Sanierungsarbeiten z.B. an Parkhausdecks ist in erster Linie die regelrechte Ausführung von Oberflächenschutzsystemen maßgeblich.

Als **Automatisierung** wird hier die gesamte Vorgehensweise bezeichnet, mit der alle Arbeitsschritte – von der mechanischen Anordnung oder Steuerung eines Sensors über die Erfassung der Messposition bis zur elektronischen Speicherung der Messdaten – ohne manuelle Eingriffe erfolgen. Messungen, bei denen Daten per Handmessung ermittelt, aber elektronisch gespeichert werden, werden als halbautomatisch bezeichnet.

Über 90% der im ZfPBau-Kompodium der BAM [BAM2005] aufgelisteten Geräte sind als Handmessgeräte konzipiert und können nicht ohne weiteres an einen Rechner zur Datenübernahme angeschlossen werden. Zudem ist für die meisten Verfahren ein hohes Maß an Erfahrung und die Kenntnis von zahlreichen Randbedingungen notwendig. Um ein Verfahren automatisieren zu können, sind ggf. Modifikationen am Sensor oder der geräteeigenen Software (Firmware) vorzunehmen (siehe Anhang Kapitel 9.5).

Nicht alle Messgrößen können mit zerstörungsfreien Verfahren direkt ermittelt werden, und zerstörungsarme oder zerstörende Verfahren sind meist nicht automatisierbar.

Für die Detektion von Bereichen mit chloridinduzierter Korrosion müssen mehrere Verfahren in Kombination eingesetzt werden, da „Korrosion“ keine physikalische Messgröße darstellt. Die **Potentialfeldmessung** dient daher als ein indirektes Nachweisverfahren für Korrosionsaktivität. Mit diesem Verfahren wird versucht, eine **Wahrscheinlichkeit** zu bestimmen, indem Potentiale, die durch den Korrosionsprozess entstehen, ortsreferenziert aufgenommen werden.

Parallel dazu durchgeführte ortsbezogene Messungen der **Betondeckung** mit dem **Wirbelstromverfahren**, der **Bauteilfeuchte** (mit dem **Mikrowellenverfahren** oder indirekt über die Messung des **elektrolytischen Betonwiderstands**) ermöglichen es, diese

Ergebnisse zu verifizieren und damit die Aussagesicherheit des Potentialmessverfahrens zu erhöhen. Auch mögliche Verfahrenkombinationen mit akustischen Verfahren werden untersucht [Idrissi2003].

Im Folgenden werden die vorgenannten Verfahren insbesondere im Hinblick auf Ihre Automatisierbarkeit für den Einsatz an großen Flächen beschrieben.

Weitere automatisierbare, zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen sind im Anhang (Kapitel 9.2) aufgeführt.

## 2.2.1 Potentialfeldmessung

Die elektrochemische Potentialfeldmessung dient zur Beurteilung aktueller Korrosionsvorgänge in der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen.

Bei diesem Verfahren wird die Spannungsdifferenz zwischen dem elektrochemischen Potential der Bewehrung und einer auf die Oberfläche aufgesetzten Elektrode mit einem sehr hochohmigen Spannungsmessgerät gemessen (Abbildung 2-4 A). In Anlehnung an die beiden entstehenden aneinandergeschalteten Halbzellen Elektrode (Metall/Flüssigkeit) und Stahlbeton (Bewehrungsstahl/Porenflüssigkeit) wird die Methode im Englischen als „Half-Cell“ Methode bezeichnet.

Meist werden Kupfer/Kupfersulfat-Elektroden (Abbildung 2-4 B) verwendet, die über einen feuchten Schwamm auf die Betonoberfläche aufgesetzt werden. Eine alternative Bauform sind Radelektroden (Abbildung 2-4 C), die sich für eine kontinuierliche Messung eignen. Die elektrische Verbindung des Messgeräts zum Bewehrungsstahl muss ggf. zerstörend durch Freilegung des Bewehrungsstahls erfolgen.

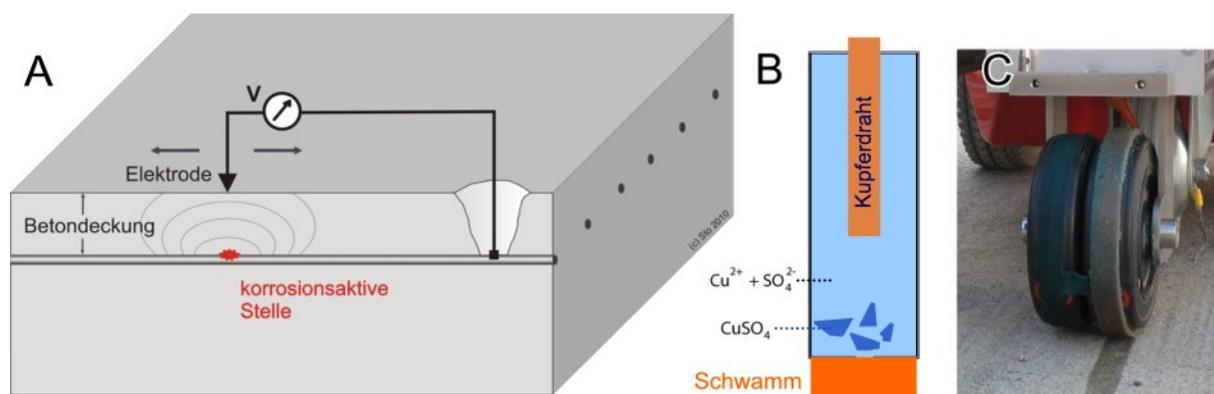


Abbildung 2-4 A: Schematischer Aufbau der Messanordnung mit Bewehrungsanschluss, hochohmigem Voltmeter und beweglicher Referenzelektrode und angedeuteten Äquipotentiallinien, B: Aufbau einer Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode, C: Radelektrode

Üblicherweise wird durch rasterförmiges Abtasten der Oberfläche der Verlauf der Äquipotentiallinien ermittelt. Bereiche mit großen negativen Potentialen geben Hinweise auf eine mögliche Korrosionsaktivität. Abbildung 2-5 zeigt Bewertungsskalen, die in Deutschland von der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) im Merkblatt B3

[DGZFP2008] und in den USA [RILEM-TC154],[ASTM876] erarbeitet wurden. Die Skalen zeigen aber auch, dass die Angabe von festen Grenzen als alleiniges Kriterium für eine Bewertung nicht zielführend ist, da durch die große Schwankungsbreite von mehreren 100 mV keine eindeutige Zuordnung aktiver (korrodierender) oder passiver Bewehrungszustände möglich ist.

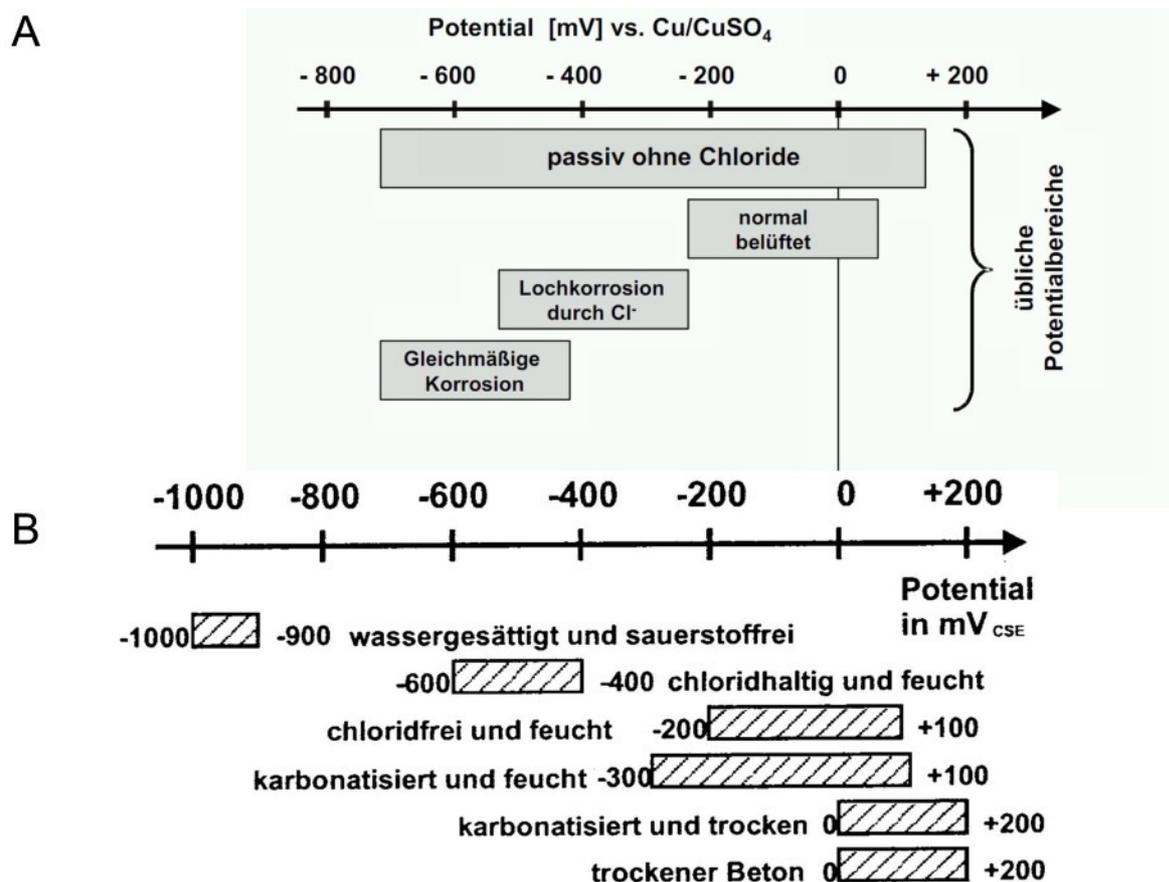


Abbildung 2-5 A: Potentialwerte von Bewehrungsstahl nach [DGZFP2008]  
 B: Potentialwerte von Bewehrungsstahl in unterschiedlichen Umgebungen nach [RILEM-TC154]

Die Interpretation der Ergebnisse ist deshalb sehr komplex, erfordert ein breites Fachwissen und Erfahrung. Grundsätzlich sind weitere begleitende Untersuchungen wie die Messung der Betonüberdeckung, die Aufnahme von Chloridtiefenprofilen (derzeitiges Standardverfahren ist hierfür eine tiefenabhängige Bohrmehlprobenanalyse), die visuelle Inspektion auf Risse und Fehlstellen, die stichprobenartige Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und nicht zuletzt eine stichprobenartige Entnahme von Bohrkernen zur Beurteilung des tatsächlichen Schädigungsgrades der Bewehrung durch Korrosion notwendig [Leelalerkiet2004].

Zusätzliche Information über die Bauteiltemperatur, Zementart und den elektrolytischen Betonwiderstand, wie in [Schneck2005] beschrieben, erhöhen die Aussagesicherheit des Verfahrens. Zitat: „Die Korrosionswahrscheinlichkeit sollte nicht allein nach absoluten, fixen

*Grenzwerten beurteilt werden, wie es beispielsweise in [ASTM876] empfohlen wird, vielmehr sollten auch **große Potentialgradienten** und der Betontyp in die Auswertung einbezogen werden“ [Schneck2005].*

Das Potentialmessverfahren stellt zwar eine relativ einfache und preiswerte Möglichkeit zur Ortung von korrosionsaktiven Bereichen – vorzugsweise bei tausalzinduzierter Korrosion – dar. Es ermöglicht jedoch keine Messung des Stadiums der Korrosion (Querschnittsverlust der Bewehrung) oder der Korrosionsrate. Die Durchführung der Messungen und die Interpretation der Messergebnisse müssen einem Spezialisten vorbehalten sein. Eine unkritische Anwendung kommerzieller Geräte kann unter Umständen zu erheblichen Fehlinterpretationen führen [Taffe2010].

Das Potentialmessverfahren ist nicht geeignet, die Korrosionsaktivität durch Karbonatisierung (vgl. Kapitel 2.1.1.2) zu messen, da es sich um einen anderen Korrosionstyp handelt, bei dem Anode und Kathode als Mikroelemente mikroskopisch zu eng nebeneinander liegen. Dadurch bilden sich keine Potentialtrichter, sondern das gesamte Potentialniveau wird negativer, was eine Beurteilung erschwert.

Bei üblichen Betonüberdeckungen zwischen 3 und 4 cm geben die an der Oberfläche gemessenen Potentiale ein gutes Bild über die tatsächliche Potentiallage der Bewehrung. Die maximale Wirkungstiefe liegt bei etwa 20 cm. Die Aussagesicherheit der Messung bezüglich der Lokalisierung kleiner Korrosionsstellen nimmt mit zunehmender Überdeckung ab.

Nur durch ein dichtes Messraster (empfohlen werden 0,25 m x 0,25 m nach [DGZFP2008]) werden auch lokal begrenzte Korrosionserscheinungen noch mit ausreichender Sicherheit detektiert. Weitere Grundlagen und Ausführungshinweise sind ebenfalls im Merkblatt B3 der DGZfP [DGZFP2008] enthalten.

Für eine halbautomatische Messung sind an den Messgeräten Eingänge für Wegmesser (Winkelcodierern) vorhanden, um einzelne Messlinien mit ortsbezogenen Messwerten aufnehmen zu können. Eine vollständig automatisierte Messung für die Anwendung ist im Bauwesen noch nicht entwickelt worden.

## **2.2.2 Betondeckungsmessung mit dem Wirbelstromverfahren**

Die Betonüberdeckung, die Bewehrungslage und der Stabdurchmesser können einerseits mit Bewehrungssuchern, basierend auf dem Wirbelstromverfahren, und andererseits mit Radargeräten (siehe hierzu Kapitel 9.2.2 im Anhang) ermittelt werden.

Beim Wirbelstromverfahren wird ein durch Spulen erzeugtes, sich zeitlich änderndes Magnetfeld durch die im Einflussbereich der Feldlinien liegenden Bewehrungselemente aus Stahl beeinflusst, Wirbelströme werden im Bewehrungsstahl induziert. Die Wirbelströme erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld, das gemäß der Lenzschen Regel der Änderung des Feldes entgegenwirkt. Mit einer zweiten Spule oder auch mit Magnetfeldsensoren kann die

Amplitude und auch die Phasenverschiebung im Vergleich zum Erregersignal detektiert werden.

Anders als in der Wirbelstromprüfung für metallische Objekte wird nicht die Änderung der Permeabilität des Materials durch Störungen (Risse, Lunker) detektiert, sondern eine Beschichtungsdicke eines nicht-magnetischen Werkstoffs (hier Beton) über dem Bewehrungsstahl ermittelt.

Moderne Geräte mit Pulsinduktionsverfahren und speziellen Spulenanordnungen im Sensorkopf können bei bekanntem Stabdurchmesser die Betondeckung im oberflächennahen Bereich in Lagen bis zu 20 cm Tiefe bestimmen. Im umgekehrten Fall kann der Stabdurchmesser bei bekannter Betondeckung, die beispielsweise durch eine Sondierungsbohrung ermittelt wurde (und unter der Annahme geeigneter Randbedingungen), bestimmt werden. Das Wirbelstromverfahren ist weit verbreitet und ein im Bauwesen anerkanntes Verfahren.

Bei der Anwendung wird der Messkopf über die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils geführt; bei der Bewegung auf einen Bewehrungsstab zu wird der angezeigte Messwert kleiner und bei Entfernung wieder größer. Das Zentrum des dabei entstehenden hyperbelartigen Messwertverlaufs, schematisch in Abbildung 2-6 B dargestellt, liefert die zur Oberfläche projizierte Lage und Tiefe (Betondeckung) des Bewehrungsstabes.

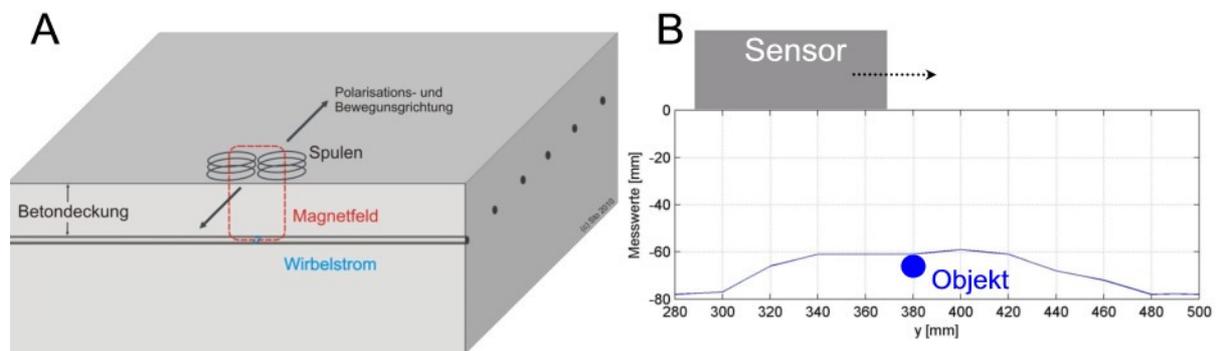


Abbildung 2-6 A: Schematische Darstellung des Wirbelstromverfahrens zur Betondeckungsmessung. B: Der Messwert ist die Distanz zu einem metallischen Objekt, erst eine Abtastung der Oberfläche erzeugt einen hyperbelartigen Messwertverlauf, in dessen Zentrum sich der gesuchte Abstand zur Oberfläche, also die Betondeckung, und die projizierte Lage zur Oberfläche ermitteln lässt.

Eine automatisierte Anwendung des Wirbelstromverfahrens ist nur aus dem Bereich der Schweißnahtprüfung bekannt. Eine großflächige Anwendung im Bauwesen gibt es bisher nicht. Typischerweise werden hier in sogenannten „Grid-Projekten“ kleine Flächen (1 m<sup>2</sup>) in einem dichten Raster mit horizontalen und vertikalen Messspuren zur lokalen Analyse der Bewehrungsstruktur manuell abgetastet. Alternativ werden auch lange Einzelspuren aufgenommen. Dabei wird mit einem mit dem Sensor verbundenen Positionsrad die örtliche Zuordnung des Messwerts dem Messgerät zugeführt.

### 2.2.3 Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren

Wie in Kapitel 2.2.1 ausgeführt, ist die Bestimmung der Bauteilfeuchte ein wichtiger Parameter zur Zustandsbewertung. Vor ca. 10 Jahren wurden in Ergänzung der klassischen zerstörenden Verfahren (Entnahme von Bohrkernen und Bestimmung der Feuchte durch Wiegen und Trocknung (Darrtrocknungsverfahren)) daher zwei zerstörungsfreie Verfahren entwickelt. Das eine basiert auf der Kernspinresonanztechnik (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) und das andere auf dem Einsatz von Mikrowellen. Beide Verfahren haben sich als erfolgreich erwiesen.

Das Verfahren der sogenannten  $^1\text{H-NMR}$  Aufsatztechnik [Wolter2002], die eine Abwandlung der klassischen NMR Technik ist und bei der nur eine einseitige Zugänglichkeit benötigt wird, wird hier nicht weiter vertieft, da die damit verbundene Messtechnik zu schwer ist und auf einem zu kleinen Tiefenbereich ( $<25\text{ mm}$ ) beschränkt ist.

Die Mikrowellenfeuchtemessung ist ein dielektrisches Messverfahren, bei dem die einzigartigen dielektrischen Eigenschaften des Wassers ausgenutzt werden. Wassermoleküle bilden sich als Dipole aus, da die Ladungsschwerpunkte innerhalb des Moleküls nicht örtlich zusammenfallen. Deswegen richten sich Wassermoleküle in einem von außen angelegten Gleichfeld in einer Vorzugsrichtung aus; sie werden polarisiert. Durch ein zusätzliches elektromagnetisches Wechselfeld können die Moleküle in Rotation in der Frequenz des Erregerfeldes versetzt werden. Makroskopisch wird dieser Effekt durch die Permittivität (dielektrische Leitfähigkeit, frühere Bezeichnung Dielektrizitätszahl)  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  beschrieben. Im Vergleich zu Baustoffen hat Wasser eine ungefähr zehnfach größere relative Permittivität  $\epsilon_r$ , somit können auch geringe Wassermengen sicher detektiert werden.

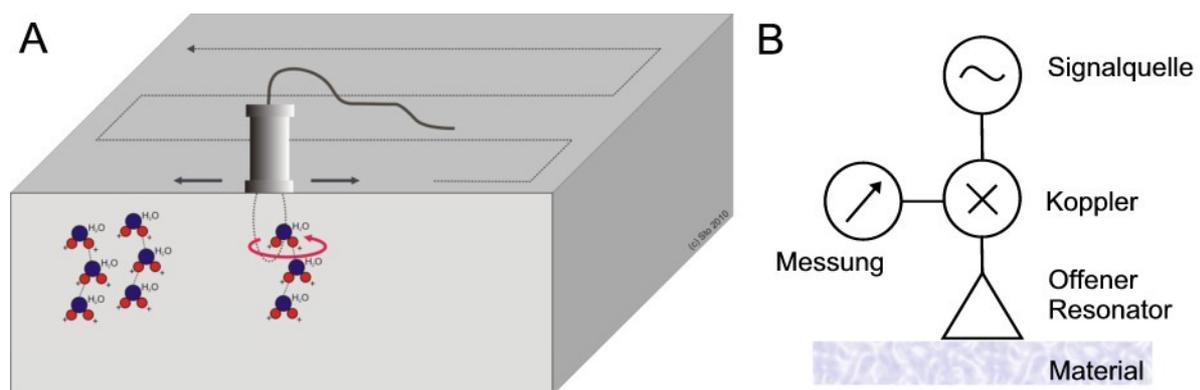


Abbildung 2-7 A: Prinzip der Mikrowellenfeuchtemessung: Die Wasserdipole werden durch ein elektromagnetisches Gleichfeld ausgerichtet und durch ein Wechselfeld in Rotation versetzt. B: Vereinfachtes Blockschaltbild der Messtechnik: das Sendesignal wird über einen offenen Resonator in das Material eingekoppelt; der Messwert wird durch den Vergleich mit der reflektierten Welle ermittelt.

Koppelt man die Felder über eine Antenne in das Material ein, so kann der Quotient aus hin- und rücklaufender Welle bestimmt werden. Für hohe Frequenzen muss die relative Permittivität als komplexe Größe betrachtet werden: Bei einer Messfrequenz von 2,45 GHz

ist der Realteil der Permittivität **weitgehend unabhängig vom Salzgehalt** des zu untersuchenden Objekts. Die Abhängigkeit zwischen dem Realteil und der Baustofffeuchte ist für eine Vielzahl von Baustoffen unterschiedlicher Porosität annähernd gleich. Der Imaginärteil ist dagegen in diesem Frequenzbereich noch abhängig vom Feuchte- und Salzgehalt [Leschnik1999].

Eine automatisierte Anwendung für eine großflächige Feuchtemessung wird in [Wieland2010] beschrieben. Hierbei werden mit mehreren Sensoren, die Empfindlichkeiten über verschiedene Tiefen aufweisen und auf einem Handwagen montiert sind, mit einem Positionsraster als Weggeber die Feuchtwerte in einem dichten Messraster aufgezeichnet und grafisch aufbereitet. Als problematisch hat sich die laterale Abweichung von Messlinien durch das manuelle Abfahren ohne entsprechende Hilfsmittel wie Orientierungslaser oder aufgezeichnete Hilfslinien herausgestellt.

Die Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren wird bislang nicht begleitend bei Potentialfeldmessungen eingesetzt. In der Praxis werden stichprobenartig Messungen des Elektrolytischen Betonwiderstands zur indirekten Ermittlung bzw. Abschätzung der Bauteilfeuchte vorgenommen.

#### 2.2.4 Feuchtemessung mit Hilfe des Elektrolytischen Betonwiderstands

Bei der Potentialfeldmessung können unterschiedliche Feuchtezustände des Betons zu Fehlinterpretationen führen. Anschaulich liegt das daran, dass bei einem höheren Wassergehalt die Leitfähigkeit (der Kehrwert des spezifischen Widerstands) des Betons größer ist. Die durch aktive Korrosion entstehenden Ausgleichsströme sind größer und damit auch die daraus entstehenden Potentiale.

Der Elektrolytwiderstand eines Betons korreliert also stark mit dessen Feuchtegehalt. Trockener Beton hat einen sehr hohen spezifischen Elektrolytwiderstand (über 100 k $\Omega$ m), wassergesättigter Beton einen sehr niedrigen (unter 100  $\Omega$ m).

Tabelle 1 gibt den Zusammenhang der Wertebereiche in Bezug zur Bedeutung für die Potentialfeldmessung wieder.

Tabelle 1 Zuordnung von Elektrolytwiderständen und ihre Bedeutung für die Potentialfeldmessung in Anlehnung an [Steck2006]

Beschreibung des Zustands	Elektrolytwiderstand R [k $\Omega$ m]	Feuchtegehalt f' in Masse-%	Bedeutung für die Potentialfeldmessung
„trocken“	$\infty > R > 1000$	$f' < 0,4$	Keine Messung möglich
„normal feucht“	$1000 > R > 50$	$0,4 < f' < 3,0$	Messbare Potentiale
„feucht“	$50 > R > 0$	$f' > 3,0$	Erhöhtes Potential in Bezug auf einen „normalen“ Zustand

Zur zerstörungsfreien Messung des elektrolytischen Betonwiderstands wird im Allgemeinen eine Anordnung nach Wenner eingesetzt.

Dabei wird ein über die äußeren Kontakte eingepprägter, konstanter Strom gemessen. Es bilden sich Stromlinien, wie dies Abbildung 2-8 A idealisiert für einen homogenen, leitfähigen Werkstoff zeigt. Über die beiden inneren Kontaktpunkte wird die entstandene Potentialdifferenz, aus Strom- und Spannungswert wird über das Ohmsche Gesetz der elektrolytische Betonwiderstand ermittelt.

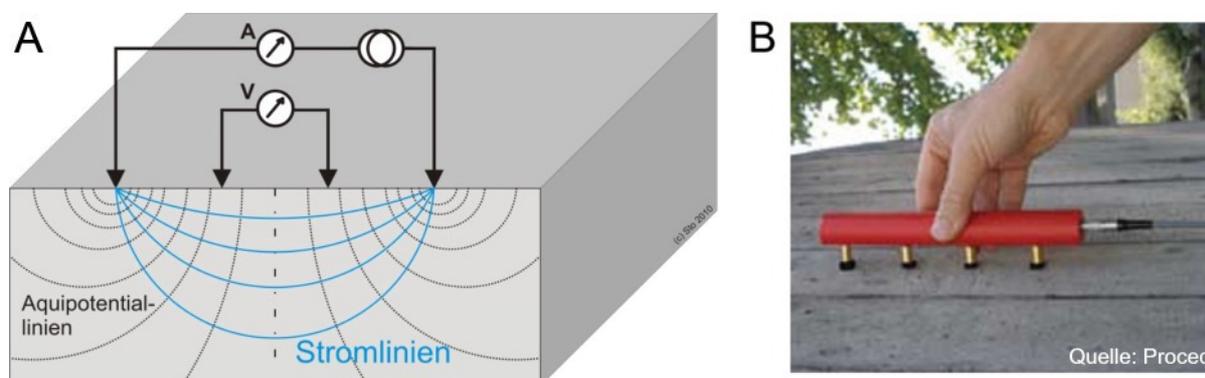


Abbildung 2-8 A: Schematischer Aufbau einer Anordnung nach Wenner, B: Elektroden

Ein kleiner Betonwiderstand kann in Kombination mit der Potentialmessung auf eine größere Wahrscheinlichkeit für eine Korrosion der Bewehrung hindeuten. Je nach örtlichem Zustand und Umgebungseinflüssen kann der Betonwiderstand jedoch erheblich variieren. Erschwerend kommt hinzu, dass sich in einem inhomogenen Werkstoff wie Stahlbeton die Verteilung der Strom- und Äquipotentiallinien nicht so ideal wie skizziert verhält. Insbesondere im Bereich oberflächennaher Bewehrung mit sehr geringer Betondeckung können Fehlmessungen durch den Einfluss des Bewehrungsstahls auftreten (siehe auch Kapitel 4.6).

Für die Messung des elektrolytischen Betonwiderstands mit der Wenner-Anordnung ist keine automatisierte Anwendung bekannt.

Eine weitere Methode zur Bestimmung des Elektrolytwiderstandes ist die sogenannte Eielektrodenmessung. Bei diesem Verfahren wird eine Messelektrode auf die Betonoberfläche aufgesetzt und mit Hilfe eines LCR-Messgeräts, das den Wechselspannungswiderstand des Betons gegen die Bewehrung misst, kann der absolute Widerstand des Betons zwischen Betonoberfläche und Bewehrung ermittelt werden. Aus den vielfach gemessenen Wechselspannungswiderständen kann durch Mittelwertbildung ein spezifischer elektrolytischer Betonwiderstand ermittelt werden.

Auch für die Bestimmung des elektrolytischen Betonwiderstands mit der Eielektrodenmessung ist keine automatisierte Anwendung bekannt. Durch die notwendige Ankopplung an die Bewehrung ist diese Methode zerstörungssarm, jedoch nicht zerstörungsfrei durchführbar.

### **2.2.5 Messung von Umgebungsbedingungen**

Klimatische Verhältnisse können unter Umständen Auswirkungen auf einige der hier beschriebenen Messverfahren haben. Manche Geräte sind bereits herstellerseitig temperaturkompensiert. Vielfach wird der Einfluss von Umgebungsbedingungen als vernachlässigbar angesehen, was nicht immer stimmt und damit die Vergleichbarkeit von Wiederholungsmessungen unter Umständen erschwert.

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchtigkeit mit entsprechenden Klimasensoren parallel zu den objektbezogenen Messungen aufzuzeichnen. Gerade bei lang anhaltenden Untersuchungen in offenen Bauwerken mit Tag-Nacht-Wechsel, bei Messungen, die über mehrere Tage mit wechselnden Bedingungen vorgenommen werden, oder bei sich wiederholenden Vergleichsmessungen zu verschiedenen Jahreszeiten ist eine Aufzeichnung dieser Daten notwendig.

Für die Potentialfeldmessung sind gleichbleibende Bedingungen der Luftfeuchte und der Umgebungstemperatur wichtig, da ein (zu schnelles) Abtrocknen der zur Messung befeuchteten Oberfläche die Aussagesicherheit der Messergebnisse vermindern würde.

## 2.3 Robotik und Automatisierung

### 2.3.1 Allgemeines

Die Robotik bietet sich als ideales Werkzeug zur wirtschaftlichen, schnellen und genauen Durchführung von flächendeckenden Prüfaufgaben an. Roboter sind per Definition nach der VDI-Richtlinie 2860 [VDI2860] „universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“

Im Folgenden werden nur mobile Robotersysteme betrachtet.

Es existiert eine Vielzahl von Systemen, die speziell daraufhin konzipiert wurden, sich autonom durch Räume zu bewegen und sich flexibel auch in unbekanntem Umgebungen orientieren zu können. Aufwand und Konzeption richten sich dabei nach den Anwendungsbereichen, für den die Roboter eingesetzt werden sollen. Diese lassen sich grob in folgende Bereiche einteilen:

- humanoide (Lauf-)Roboter
- Industrie-, Transport- und Lagerroboter
- Serviceroboter (für Reinigung, Rasenmähen ...)
- Spielroboter (Beispiel: Fußballroboter)
- Militärroboter (für Aufklärungs- und Kampfszwecke)
- Erkundungsroboter (nicht militärisch)

Die Grenzen der Systeme und deren Namensgebungen sind fließend; auch (mobile) Industrieroboter werden oft als Serviceroboter bezeichnet, militärische Systeme, die zur Kampfmittelbeseitigung (Minensuche) entwickelt wurden, können auch im zivilen Bereich zur Erkundung eingesetzt werden.

Bei vielen Entwicklungen mobiler Robotersysteme stand zu Beginn die Forschung hinsichtlich der mechatronischen Ausführung und der Softwareentwicklung im Vordergrund, an die sich eine messtechnische oder aufgabenorientierte Anwendung anschloss. Abgesehen von den Laufrobotern können an allen rad- oder kettengetriebenen Systemen Sensoren für eine großflächige Erkundung ebener Flächen angebracht werden.

Beispiele für diese messtechnischen Anwendungen für mobile Roboter (neben den klassischen Molchen (engl. Pig)) finden sich in der Pipeline- und Tankinspektionstechnik. Diese Systeme werden meist mit Kameratechnik zur visuellen Inspektion ausgerüstet. Neben halbautomatischen Systemen, die von einem Bediener geführt werden, gibt es auch Ansätze zu autonomen Systemen, beispielsweise zur Leckortung mit Gassensoren [Wandel2004].

Einige typische Entwicklungen mobiler Robotersysteme zeigt Abbildung 2-9. Die bekanntesten Anwendungsgebiete für autonome und halbautomatische Erkundungsroboter,

die mit Sensoren bestückt werden, sind die unbemannte Raumfahrt [NASA] (Abbildung 2-9E) und die Unterwasserrobotik (Abbildung 2-9F).

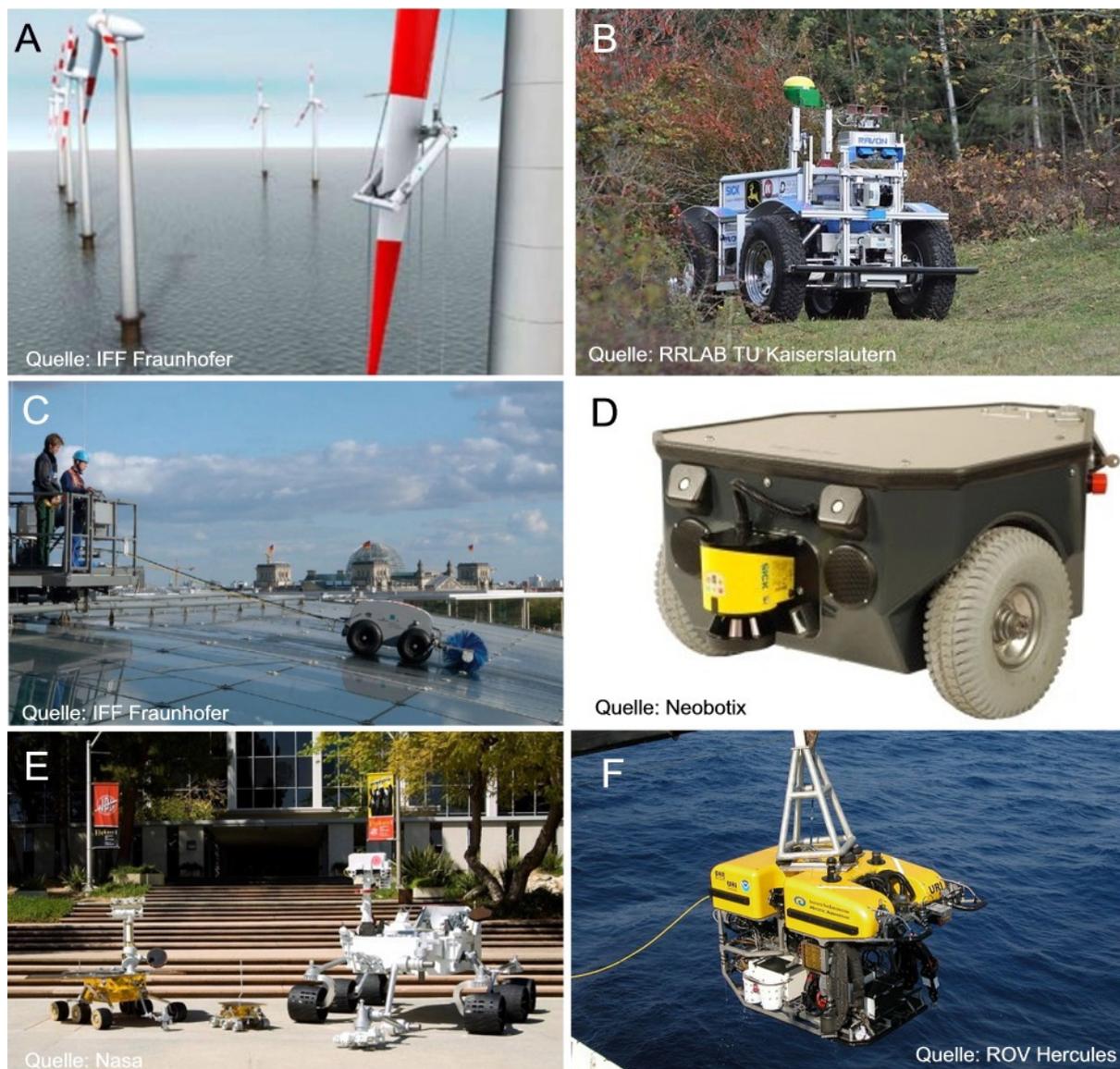


Abbildung 2-9 A: Innonet Projekt RIWEA [IFF-Fraunhofer], Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall, B: Robust Autonomous Vehicle for Off-road Navigation (RAVON) [RRLAB], C: Ferngesteuerter Fassadenreinigungsroboter (Filius) [IFF-Fraunhofer], D: Basisplattform für automatischen Transport, mobile Manipulation oder Wach- und Telepräsenzaufgaben [Neobotix], E: Studien der Roboterplattformen der Nasa Mars Rover Spirit Mission [NASA], F: Unterwasserroboter für Meerereskundung [Oceanexplorer]

Einen guten Überblick über Forschungsprojekte und kommerziell erhältliche Serviceroboter, die mit Sensoren bestückt sind oder sich dazu eignen, liefert die Website der „Robotics & Automation Society“ [RAS]. Die Zahl der Unterwasserrobotersysteme ist sehr groß, eine gute Zusammenfassung liefert [UnderwaterRobot].

Die Beispiele zeigen, dass die Robotik in vielen Bereichen bereits für messtechnische Aufgaben eingesetzt wird. Meist werden die Systeme zur Erkundung schwer, unzugänglicher oder gefährlicher Bereiche verwendet.

Für den Bereich der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen stellt diese Arbeit ein völlig neues Einsatzgebiet für Roboter in der Erkundung von Stahlbetonflächen vor. Es konnten keine Quellen ermittelt werden, die ein annähernd ähnliches System beschreiben.

### 2.3.2 InnoNet Projekt „BetoScan“

BetoScan ist ein Projekt aus dem Programm zur „Förderung von innovativen Netzwerken“ (InnoNet). Es wurde gefördert durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie [BMWi] und von mir in den Jahren 2007 bis 2009 geleitet.

Ziel des BetoScan-Projektes [BetoScan] war es, eine selbstfahrende und selbstnavigierende Plattform für Sensoren und Messgeräte zu konzipieren und einen Demonstrator im Rahmen des Vorhabens zur großflächigen Untersuchung von Betonflächen in Parkhäusern aufzubauen. Die Roboter-Plattform kann die Flächen selbstständig in einem vorwählbaren Raster abfahren und dabei die Messdaten ortsreferenziert aufzeichnen. Abbildung 2-10 A zeigt die Plattform bei einem Messeinsatz in einem Parkhaus. Abbildung 2-10 B eine mögliche Kombination an Sensoren.

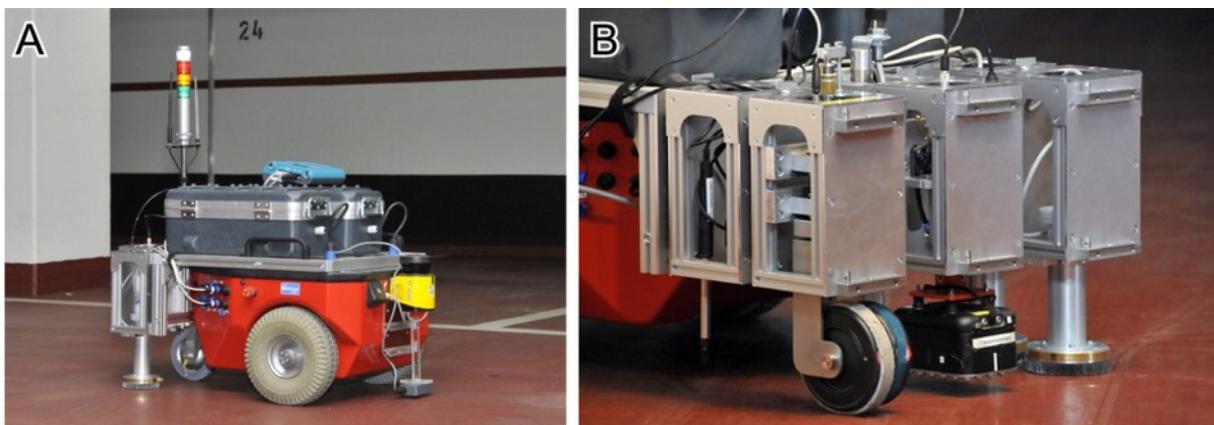


Abbildung 2-10 A: BetoScan Roboterplattform im Parkhaus mit Laserscanner zur Positionsbestimmung (gelb) und Wirbelstromsensor (unterhalb, grau)  
 B: Sensorrahmen an der Roboterplattform mit Elektrodenrad, Ultraschallmesskopf und Mikrowellen-Feuchtesensoren (v.l.nr.)

Die Plattform kann mit Wirbelstromsensoren, Radarantennen, Mikrowellenfeuchtesensoren, Ultraschallpunktkontaktprüfköpfen, Impakt Echo Sensoren und Elektrodenrädern für die Potentialfeldmessung oder Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung) bestückt werden. Weitere Ausführungen hierzu im Anhang (Kapitel 9.5) oder auf der Projekt Webseite [BetoScan].

Abbildung 2-11 zeigt die Struktur der Grundkomponenten des BetoScan-Systems. Es besteht aus

- Steuerungs PC für die Benutzerinteraktion und Software zur globalen Steuerung des Sensorik- und Navigationsrechners (Grafisches User Interface, GUI)
- Roboterplattform mit Antrieb, Positionssensoren und Navigations PC
- ZfP-Sensoren mit Sensorik PC.

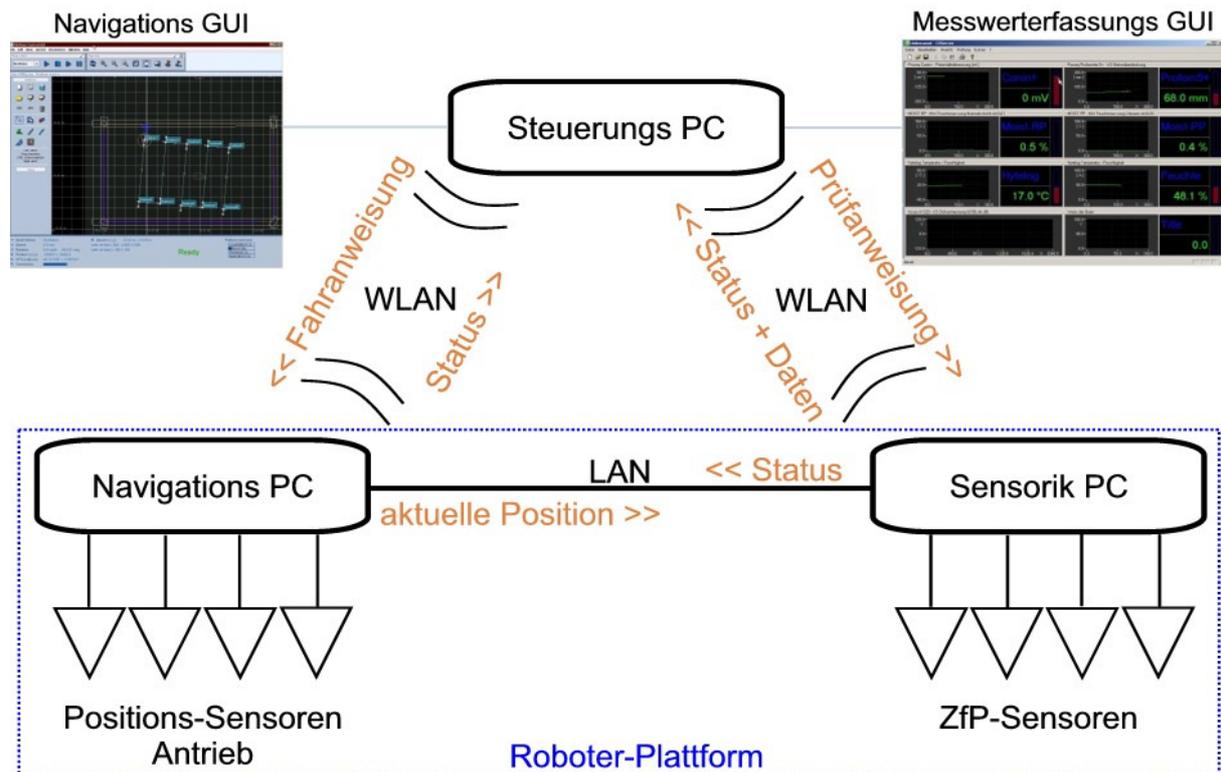


Abbildung 2-11 Struktur der Komponenten und Kommunikationswege des BetoScan-Systems

Durch einen vom Nutzer konfigurierbaren Messplan wird vorgegeben, in welchem Raster Messwerte aufgenommen werden sollen. Innerhalb einer Messspur kann jeden Zentimeter eine Messung ausgelöst werden. Die frei wählbaren Abstände der Messspuren untereinander betragen typischerweise je nach Anwendung 20, 50 oder 100 cm (siehe Kapitel 4.2). An jedem Messpunkt werden von den Messgeräten Messwerte oder Zeitreihen („A-Bilder“) abgerufen und ortsreferenziert gespeichert.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit flossen größtenteils direkt in die Entwicklung des Demonstrators ein, weshalb im Folgenden an geeigneter Stelle beispielhaft Bezug auf das Projekt und die Untersuchung von Parkhäusern genommen wird.

Prinzipiell lassen sich die Erkenntnisse aber auf alle Bauwerke mit horizontalen Betonflächen und auf andere automatisierte Systeme übertragen.

### 2.3.3 Positionsbestimmung

In der Robotik wird die Fähigkeit eines autonom navigierenden Roboters, seine **Pose** in seiner Umgebung festzustellen, als Lokalisierung bezeichnet. Die Pose (nach [DIN EN ISO 8373]) setzt sich zusammen aus der **Position und der Orientierung** des Roboters in einem kartesischen Koordinatensystem. Im hier betrachteten zweidimensionalen Fall also aus seinen Abständen entlang der Koordinatenrichtungen  $x$  und  $y$  zu einem frei gewählten Ursprung des Basiskoordinatensystems und aus einem Winkelversatz, der durch die Drehung  $\alpha$  des Roboterkoordinatensystems ( $x'/y'$ ) zum Basiskoordinatensystem ( $x/y$ ) beschrieben werden kann. Für eine an der Roboterplattform angebrachte Sensorik muss der jeweilige Versatz (Offset) im Roboterkoordinatensystem ( $x'/y'$ ) bekannt sein, um die wahre Position des Sensors errechnen zu können (Abbildung 2-12).

Im einfachsten Fall der sogenannten lokalen Lokalisierung ist dem Roboter seine Ausgangspose bekannt, und die aktuelle Pose wird bei seiner Fortbewegung kontinuierlich ermittelt und plausibilisiert.

Um die Pose bestimmen zu können, müssen je nach System ein oder mehrere verschiedene Verfahren und Sensoren verwendet und kombiniert werden. Meist werden die durch die angeschlossenen Sensoren ermittelten Positionsdaten zusammengeführt, um Abweichungen der Einzelverfahren bei der Positionsbestimmung auszugleichen und eine hinreichend genaue Lokalisierung zu erzielen.

Als Sensoren kommen zur lokalen Positionsbestimmung und der Eigenbewegung Odometer und Distanzsensoren wie Ultraschallsensoren und Laserscanner in Frage. Zur globalen Positionsbestimmung durch Messung der absoluten Position werden GPS-Geräte (GPS = Global Positioning System) und Tachymeter verwendet.

In der sogenannten Odometrie wird bei bodengebundenen, radgetriebenen Robotern die Messung der Raddrehungen zur Positionsbestimmung ausgenutzt. Diese ist allerdings durch Einflüsse wie Radgeometrie, Bodenbeschaffenheit oder die Fahrgestellgeometrie soweit fehlerbehaftet, dass die wahre Pose durch andere Verfahren korrigiert und verifiziert werden muss.

Die hierzu gebräuchlichste Methode ist das „Scan-Matching“. Bei diesem Verfahren wird zunächst aufgrund von Odometriedaten die Pose des Roboters abgeschätzt. Parallel hierzu werden Distanzmessungen zu klar unterscheidbaren Objekten in der Umgebung (Landmarken) beispielsweise mit einem Laserscanner durchgeführt. Aus diesen beiden Positionsschätzungen wird dann die wahre Pose errechnet.

Weitere extern zugeführte absolute Positionsdaten von Differential-GPS-Geräten (dGPS-Geräten) oder Tachymetern können die Robustheit der Positionsbestimmung gegen Messabweichungen durch Schwankungen der Einzelsensoren weiter verstärken:

Bei dGPS-Geräten werden die Ungenauigkeiten im GPS-Signal durch die Kompensation mit den Werten eines ortsfesten Referenzempfängers auf eine Genauigkeit im cm-Bereich verbessert.

Moderne motorisierte Tachymeter sind eine Kombination aus Theodolit und einem selbstfolgenden elektrooptischen Distanzmessungssystem (Laser), das es ermöglicht, die Position eines Objekts, an dem ein Tripel-Prisma montiert ist, im Bereich von 1.000 m mit Genauigkeiten ebenfalls im cm-Bereich zu bestimmen.

Prinzipbedingt kann mit einem Tachymeter nicht die Orientierung des verfolgten Objektes bestimmt werden. Ist neben der Position auch die Kenntnis der Orientierung des jeweiligen Sensors notwendig, so können zu diesem Zweck elektronische Kompassse eingesetzt werden.

Bei großflächigen Untersuchungen ohne geeignete feste Reflexionsobjekte, die für ein lokales Laserscannersystem eines Roboters notwendig sind, können diese zusätzlichen externen Positionsinformationen zwingend notwendig sein.

Im Beispiel des im BetoScan-Projekt verwendeten Roboters werden die Odometriedaten der Antriebsräder in Kombination mit den Daten eines 270°-Laserscanners mit der „Scan-Matching“ Methode zur Positionsbestimmung herangezogen. Die wahre Position eines Sensors kann über Winkelbeziehungen errechnet werden (Abbildung 2-12).

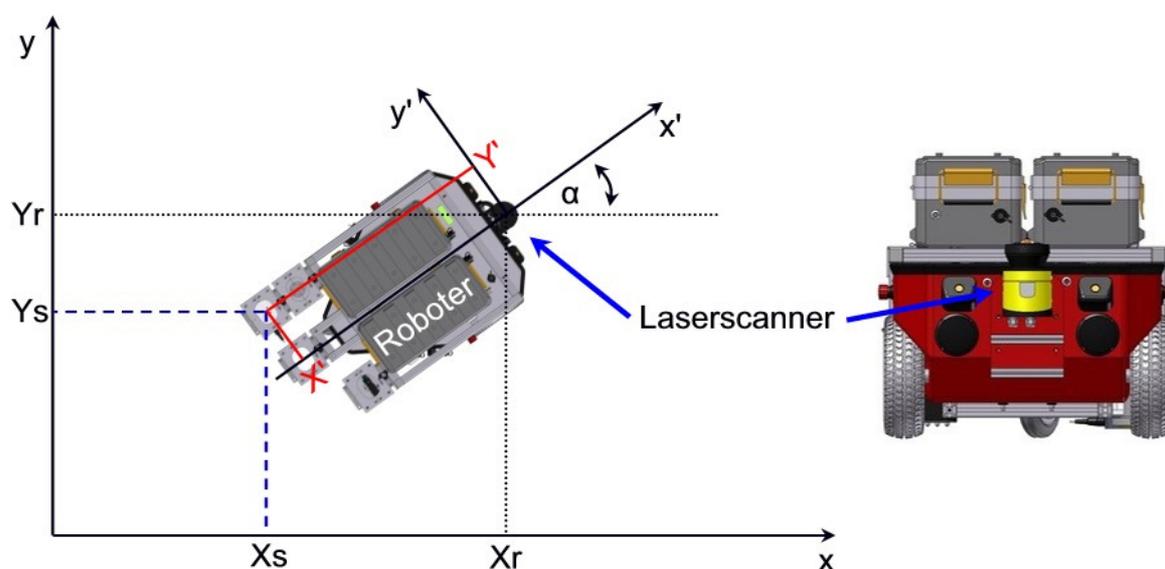


Abbildung 2-12 Basiskoordinatensystem  $x/y$  mit beliebiger Orientierung des Roboterkoordinatensystems  $x'/y'$ . Die Pose des Roboters wird beschrieben durch  $X_r, Y_r$  am Ort des Laserscanners und den Drehwinkel  $\alpha$ . Die wahre Position  $X_s, Y_s$  eines jeden Sensors wird durch Drehung (Koordinatentransformation) und seinen festen Offset  $X', Y'$  im Koordinatensystem  $(x'/y')$  errechnet.

Es handelt sich hierbei um eine linksdrehende Koordinatentransformation mit einer linearen Verschiebung. Die wahre Position  $X_s, Y_s$  eines jeden Sensors mit dem konstanten Offset  $X', Y'$  an der zum jeweils gültigen Zeitpunkt berechneten Roboterposition  $X_r, Y_r$  berechnet sich zu:

$$X_s = X_r + X' \cdot \cos \alpha - Y' \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

und

$$Y_s = Y_r + X' \cdot \sin \alpha + Y' \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Die Problematik der richtigen Wahl des Offsets im Hinblick auf den Versatz zur Mittelachse der Fahrspur wird ausführlich in Kapitel 4 diskutiert.

Bei Bauwerksuntersuchungen mit Handmessungen, bei denen meist mit Messband und ggf. einem Theodolit ein Raster mit Messlinien am Messobjekt aufgezeichnet und vermessen wird, werden die **Positionen** (später) manuell Messpunkten zugeordnet. Im Gegensatz hierzu hat die automatisierte Positionsbestimmung mit einem Roboter oder halbmanuellen System den entscheidenden Vorteil, dass jederzeit die aktuelle und zugleich wahre **Pose** (Position **und** Orientierung) bekannt ist und zusammen mit den Verfahrensmesswerten elektronisch gespeichert werden kann. Bei Verfahren mit einer Vorzugsrichtung (Polarisation) wie beispielsweise Radar ist die Kenntnis der Orientierung für die Auswertung notwendig.

Die Tendenz geht für großflächige Untersuchungen wie bei Anwendungen mit Georadar eindeutig dazu, auch bei manuellen Messungen verstärkt die echten Positionsdaten beispielsweise mit Hilfe von GPS oder Tachymetern zu erfassen und einem Messsystem zuzuführen (Abbildung 2-13).



Abbildung 2-13 Halbautomatische Radarsysteme mit ortsreferenzierter Datenaufnahme per Global Positioning System (GPS)

Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen werden solche Systeme bislang wenig genutzt. Insbesondere im Bereich von Parkhäusern oder geschlossenen Bauwerken, bei denen kein GPS-Empfang möglich ist, können die Systeme nicht eingesetzt werden. Für stichprobenartige Einzelmessungen oder gelegentliche Serienmessungen per Hand ist der

Aufwand und die Kosten für solche Systeme zu groß. Erst mit der Notwendigkeit einer groß- und vollflächigen Untersuchung werden automatisierte Systeme auch wirtschaftlich in Betracht gezogen.

**Fazit:** Um ortsreferenziert Messdaten aufzunehmen, steht eine Vielzahl kommerzieller Technik zur Verfügung, die aber an die entsprechende Aufgabe und Randbedingungen angepasst werden muss. Mit steigendem Aufwand, Kombination von Verfahren und den damit verbundenen Kosten kann die Positionsgenauigkeit entsprechend den Anforderungen erhöht werden.

Für die im Kapitel 3.2 beschriebene Differenzpotentialfeldmessung ist es bei automatisierten Messungen wichtig, die Pose (also Position **und** Orientierung) jedes Messpunktes zu erfassen, da die Spannungsdifferenzwerte in der richtigen Orientierung (also als Vektoren) erfasst werden müssen.

### 2.3.4 Ortsreferenzierte Multikanal-Messwerterfassung

Multikanalmesssysteme mit Anbindung an Positionsdaten kommen insbesondere bei der Untersuchung von (Verkehrs-) Infrastrukturen überall dort zum Einsatz, wo in kurzer Zeit viele Messdaten mit einer hohen Punktdichte automatisiert und ortsreferenziert aufgenommen werden sollen. Dies liegt an oft nur kurzen Zeitfenstern von Sperrungen in denen die Messflächen zur Verfügung stehen oder an der Notwendigkeit im laufenden Betrieb oder im Verkehr messen zu müssen.

Für die Untersuchung von Erdöl- und Erdgaspipelines werden autonome Roboter (sogenannte Molche, Abbildung 2-14 D) eingesetzt, die (zusammen mit dem Öl oder Gas) mit hoher Geschwindigkeit (bis zu 2 m/s) durch eine Pipeline gepumpt werden und auf ihrem Weg die Pipeline auf Fehlstellen (Risse, Korrosion) untersuchen. Die Multisensorik besteht meist aus Feldern (Arrays) von gleichartigen Sensoren, die am Umfang des Molchs angebracht sind und unter spezieller Beachtung der extremen Umgebungsbedingungen wie Schock, Vibration, Feuchte und hohen Temperaturen entwickelt wurden. Datenvolumen von bis zu mehreren Megabyte pro Sekunde müssen erfasst, verdichtet und gespeichert werden. Diese hohen Datenraten sind nur möglich durch eigens für diesen Aufgabenbereich entwickelte Hardware mit schneller Multiplexer- oder Parallelmesstechnik und Signalprozessoren [Dobmann2008].

Für Tunnelbauwerke werden mit modernen Laservermessungssystemen ausgerüstete Fahrzeuge (Abbildung 2-14 A) eingesetzt, die neben der optischen Vermessung auch eine Möglichkeit zur optischen Risserkennung bieten [Spacetec].

Tunnelbauwerke werden ebenfalls mit Inspektionszügen (Abbildung 2-14 B), auf denen mehrkanalige Radarsysteme installiert sind, untersucht, um Lockergestein, Feuchtebereiche, Hohlräume und Felshorizonte zu detektieren [Wiebe].

Die Inspektion von Bahntrassen erfolgt mit eigens konstruierten Gleisinspektionszügen (Abbildung 2-14 B). Diese werden mit moderner mehrkanaliger Video-, Laservermessungs-

und Radartechnik bestückt und können bei hohen Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h Zustandsinformationen über Schienen, Schwellen, Befestigungen und Gleisbett liefern.

Im Straßenbereich werden zur Inspektion von Unterbau, Deck- und Tragschicht der Fahrbahnen Fahrzeuge mit mehrkanaligen Radar- und Videosystemen ausgestattet (Abbildung 2-14 C). Die Messungen werden bei laufendem Verkehr ermittelt.

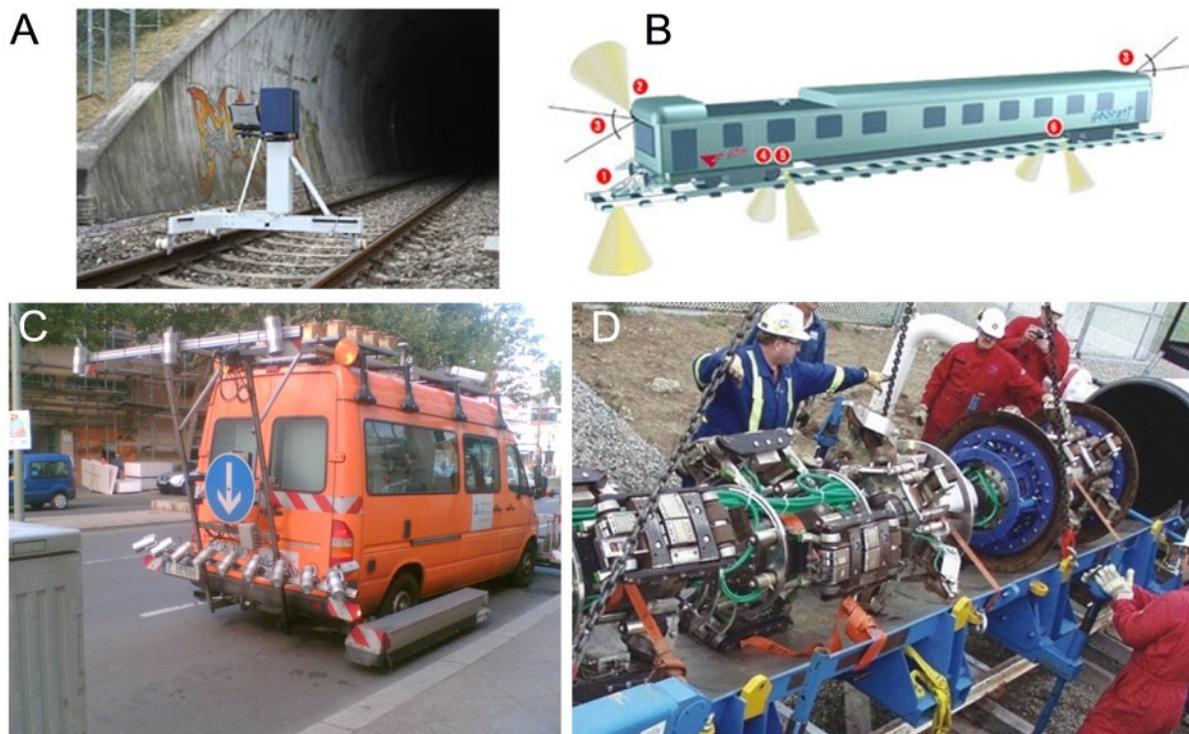


Abbildung 2-14 Messfahrzeuge und Roboter mit Multikanalmesswerterfassung für technische Infrastrukturen A: Tunnelinspektion [Spacetec], B: Gleisinspektion [Wiebe], C: Straßeninspektion [TüV-Rheinland], D: Pipelineinspektion [IZFP-Fraunhofer]

All diese Systeme haben gemeinsam, dass sie von der Anwendung her eine quasi eindimensionale, zeilige oder kreisförmige Multikanalmesswertaufnahme in orthogonalen Schnitten zur Fahrtrichtung entlang einer Schiene, Rohres (Pipeline) oder einer Straße aufnehmen. Diese parallele Datenaufnahme verbunden mit den höheren Kosten für eine Vielzahl von Sensoren ist notwendig, um mit einer möglichst breiten Zeile den gesamten Untersuchungsquerschnitt (im Fall der Pipeline den gesamten Umfang) bei gleichzeitig hoher Fahrgeschwindigkeit zu realisieren.

Diese Schnitte werden dann zu einem zweidimensionalen Abbild grafisch zusammengesetzt und anschließend ausgewertet. Das erhobene Datenvolumen kilometerlanger Strecken lässt eine komplette manuelle Sichtung nicht mehr zu, so dass automatisierte Auswertungsalgorithmen die Daten vorab bewerten oder kategorisieren und den Prüfer gezielt auf einzelne Anzeigen hinweisen.

Im Fall von flächigen Datenerhebungen kann diese Verfahrensweise für eine weitere Dimension adaptiert werden und beispielsweise durch Mittelwertbildung und die Festlegung von Schwellwerten über geeignete Kriterien auffällig visualisiert werden.

Im Fall klassischer Multikanalsensorik kann meist davon ausgegangen werden, dass ein Verfahren mit einer Vielzahl gleichartiger parallel messender Sensoren ("Kanälen") von einem Messwerterfassungsrechner oder einer speziellen Messhardware bedient wird. Unterschiedliche Sensoren werden meist von getrennten Systemen erfasst, wenn sie nicht den gleichen Kommunikationsweg oder Ursprung haben.

Im Falle der in dieser Arbeit beschriebenen Multikanalsensorik bedeutet ein Kanal, dass nicht nur ein anderer Sensor angeschlossen ist, sondern sich sein Kommunikationsweg auch von denen der anderen Sensoren vollkommen unterscheiden kann. Aus der Literatur ist kein anderes Multisensoriksystem für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen bekannt.

# 3 Von der Potentialfeldmessung zur Differenzpotentialfeldmessung

Bei einer großflächigen Ermittlung der Potentiale – automatisiert wie manuell – sind zwei Umstände hinderlich: Zum einen der erforderliche galvanische Zugang zur Bewehrung (Abbildung 3-1 A), zum anderen das umständliche Hantieren mit einem Schleppkabel, das die Bewehrung und das hochohmige Spannungsmessgerät miteinander verbindet. Die Methode, den zerstörenden Eingriff bei Freilegen oder Anbohren der Bewehrung durch die Verwendung einer zweiten ortsfesten Referenzelektrode (Abbildung 3-1 B) zu vermeiden, kommt in der Praxis kaum zur Anwendung.

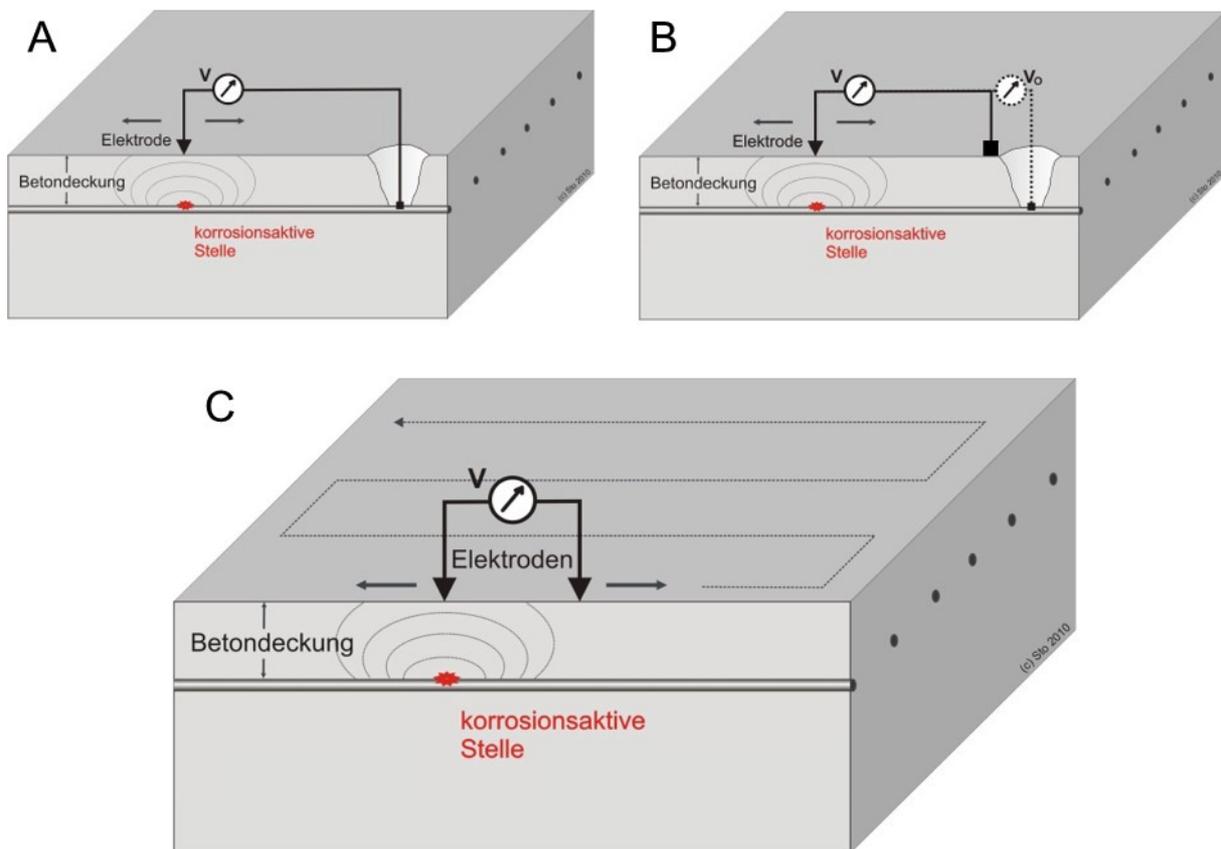


Abbildung 3-1 A: Schematische Darstellung der Standardanordnung einer Potentialfeldmessung mit Bewehrungsanschluss und **beweglicher** Referenzelektrode  
B: Potentialfeldmessung mit zwei Referenzelektroden. Die zweite Elektrode **bleibt ortsfest** im Bereich des nicht mehr genutzten Bewehrungsanschlusses; für Vergleichszwecke wird der Spannungsoffset  $V_0$  bestimmt.  
C: Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung) mit **zwei beweglichen** Elektroden, die gemeinsam mit einem festen Abstand zueinander über die Messfläche geführt werden.

Im folgenden Kapitel 3.1 wird der aktuelle Stand der Forschung beschrieben, der die Idee lieferte, ein neues Verfahren zu entwickeln. Die Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung, Kapitel 3.2) mit zwei beweglichen Referenzelektroden gemäß Abbildung 3-1 C ermöglicht es, große Flächen automatisiert und ohne Schleppkabel sowie ohne direkten Zugang zur Bewehrung zu untersuchen und eine Lokalisierung von Bereichen mit hoher Wahrscheinlichkeit für aktive Korrosion zu bestimmen.

Im Unterschied zur Potentialfeldmessung werden hier Spannungsdifferenzen zwischen eng benachbarten Messpunkten **nicht berechnet**, sondern **gemessen** und daraus der Gradient ermittelt. Im Folgenden wird aufgezeigt, dass der Gradient ein stärkeres, aussagekräftigeres und verlässlicheres Bewertungskriterium ist.

Aus praktischen Anwendungen ist bekannt, dass die Einstufung von Bauteilen hinsichtlich einer vorliegenden Korrosionsgefahr deutlich unterschätzt oder überschätzt werden kann, wenn nur die Ergebnisse einer Potentialfeldmessung betrachtet werden.

Letztendlich werden stets Sondierungsöffnungen und Chloridanalysen ausgeführt, um die unsichere Aussage einer Potentialfeldmessung zu verifizieren. Die Unsicherheiten bestehen zum einen darin, dass kleine Anoden durch ein zu groß gewähltes Messraster übersehen werden können, zum anderen darin, dass die Potentialfeldmessung nicht angibt, wie stark eine Korrosion bereits fortgeschritten ist. Deshalb werden hohe negative Potentiale lediglich als eine Wahrscheinlichkeit für Korrosion interpretiert, während positive Potentiale auf einen passiven Zustand der Bewehrung schließen lassen können (vgl. Kapitel 2.2.1).

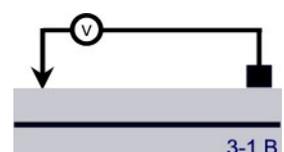
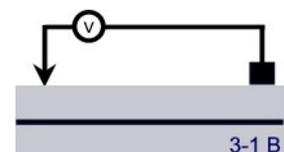
Die flächendeckende Ermittlung von Betondeckungswert, Bauteilfeuchte, elektrolytischem Betonwiderstand sowie der Umgebungstemperatur als wichtige Interpretationshilfen bzw. Bewertungskriterien für eine Korrosionswahrscheinlichkeit, erhöht die Aussagesicherheit des Verfahrens bei großflächigen Untersuchungen maßgeblich.

## 3.1 Stand aktueller Forschung

Bevor im Kapitel 3.2 die DP-Messung ausführlich beschrieben wird, werden an dieser Stelle aktuelle Forschungsarbeiten aufgeführt, die maßgeblich zur Lösungsfindung und Ideengebung bei der Entwicklung der DP-Messung beigetragen haben.

### 3.1.1 Potentialfeldmessung

Vergleicht man die Ausführungen des Merkblatts B3 der DGZfP zur Potentialfeldmessung in den Versionen von 1990 [DGZFP1990] und 2008 [DGZFP2008], so stellt man fest, dass in der neuen Version die Möglichkeit einer Ankopplung ohne Bewehrungsanschluss mit einer zweiten Elektrode als ortsfeste Referenz (vgl. Abbildung 3-1 B) nicht mehr erwähnt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Methode in der Praxis kaum angewendet wurde. Dem gegenüber stehen aktuelle Forschungsarbeiten. Die Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz [Büchler2007] untersuchte eingehend Potentialfeldmessungen mit zweiter Referenzelektrode (entsprechend Abbildung 3-1 B).



Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Laborversuche mit künstlich mit Strom beaufschlagten Anoden in wässriger Lösung, Versuche mit Betonprobekörpern mit und ohne Bewehrungsstahl, Versuche mit Variationen der Anodenlänge und / oder der Betondeckung, Versuche mit Variation der Position der ortsfesten zweiten Elektrode und zusätzlich Simulationen der Makroelemente durchgeführt. Des Weiteren wurde der Einfluss der Feuchte, des pH-Wertes und des Chloridgehalts auf die Potentialfeldmessung untersucht, die Breite von Potentialtrichtern in Abhängigkeit der Überdeckung ermittelt und die Einzelergebnisse in Felduntersuchungen an Bauwerken anhand von Betonabtragung verifiziert.

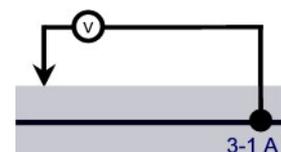
Die Autoren [Büchler2007] kommen zu dem Schluss, dass sowohl die Messungen der Potentiale wie die der Spannungsdifferenzen der Differenzanordnung zu **identischen** Ergebnissen führen, da sie sich nur durch einen konstanten Spannungswert (Offset) unterscheiden. Die statistische Auswertung der ermittelten Daten ermöglicht eine genauso zuverlässige Lokalisierung der Korrosionsstellen wie die klassische Potentialfeldmessung. Zu beachten ist allerdings, dass die zweite ortsfeste Referenzelektrode während der gesamten Messdauer einen stabilen Wert (Offset  $V_0$ , vgl. Abbildung 3-1B) liefern muss und nicht im Zentrum eines Potentialtrichters eines korrosionsaktiven Bereichs platziert werden darf.

Sind diese Bedingungen erfüllt, so ist eine elektrische Vermaschung der Bewehrung nicht zwingend erforderlich, sondern **es reicht eine rein elektrolytische Verbindung zwischen verschiedenen Abschnitten aus.**

Hinsichtlich der Detektierbarkeit von korrosionsaktiven Bereichen wird ausgeführt, dass sich kleine, 2 cm große Anoden (Korrosionsstellen) nur bei einer Betondeckung von 2 cm und einem Messraster von 5 cm lokalisieren lassen. Größere Anodenlängen von 10 cm Länge können noch bei 4 cm Betondeckung und 15 cm Messraster erfasst werden. Kleinere Anoden als 2 cm Länge sind praktisch nicht detektierbar.

In den Feldversuchen wurde der tatsächliche Korrosionsabtrag nach den Messungen durch Freilegen der Bewehrung ermittelt: Alle Bereiche mit einem Querschnittsverlust größer als 2 mm konnten ermittelt werden, es wurden aber auch größere Bereiche ohne Korrosion als potentiell korrosionsgefährdet eingestuft. Generell, so das Résumé, erfolge hier eine Überschätzung. Zur Detektion kleinerer korrosionsaktiver Bereiche ist ein engeres Messraster erforderlich.

In Bereichen mit ausgeprägten hohen negativen Potentialwerten ist von einer großen Korrosionswahrscheinlichkeit der Bewehrung auszugehen. Allerdings ist die Angabe von festen Grenzwerten (vgl. Kapitel 2.2.1) nicht zielführend [Dauberschmidt2010]. Im passiven Zustand kann der Potentialbereich einer Bewehrung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern über einen recht großen Bereich (mehrere 100 mV) schwanken. Allein aufgrund



der Potentialwerte ist dann eine eindeutige Zuordnung aktiver (korrodierender) oder passiver Bewehrungszustände nicht möglich.

Um die Aussagekraft einer Potentialfeldmessung zu erhöhen, wird auf die Bestimmung der Potentialgradienten zurückgegriffen. Der Gradient ist eine Funktion eines Skalarfeldes, welcher die Änderungsrate und die Richtung der größten Änderung in Form eines Vektorfeldes angibt. In Bezug zu einer Potentialfeldmessung ist dies die größte Änderung eines Potentialwertes zu seinen Nachbarpotentialwert je Längeneinheit. Die Einheit des Gradienten bei der Potentialfeldmessung wird in Millivolt je Meter (mV / m) angegeben.

Im EU-Projekt LIFECON („Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability“) [Lay2003] wurden Bewertungskriterien mit einem Punktesystem zur Zustandsbewertung erarbeitet (Abbildung 3-2). Gradienten ab 100 mV / m führen hier zu einer Punktwertung, die der Punktwertung bei Potentialen zwischen -700 mV und -350 mV entspricht. Bemerkenswert ist, dass Gradienten über 200 mV / m noch stärker bewertet werden und dass die Gradientenbewertung zuverlässiger als die Potentialfeldmessung eingeschätzt wird (siehe rot markierte Fußnote „less reliable“).

*Scoring of test methods for boundary 2 to 3*

Test	Criteria	Score
Visual Inspection of Concrete Surface	Crack/spalling/delamination	12
	No crack	0
AAR	AAR Attack (petrographic analysis/ map cracking)	12
	AAR susceptible	4
	Not susceptible or no attack	0
Freeze/Thaw	Loss of section >10 mm, delamination of concrete cover	12
	Deterioration up to 10 mm, thin scars in surface, partly loose fine sand grains, scaled cement mortar between grains	4
	Deterioration up to 4 mm, thin scars in surface, partly loose fine sand grains	0
Half cell (absolute)	≤-700mV	2
	>-700 mV and ≤-350mV	6
	>-350mV and ≤-200mV	4
	>-200mV	0
Half cell (difference)	Difference ≥200mV in 1m within segment	8
	Difference ≥100mV in 1m within segment	6
	Difference <100mV in 1m within segment	0
Chloride Concentration at Reinforcement	≥1.0 % by weight of cement	6
Carbonation	≥cover	4
	<cover	0
Corrosion rate	≥0.5μAcm <sup>-2</sup>	6
	≥0.1μAcm <sup>-2</sup> and <0.5μAcm <sup>-2</sup>	4
	<0.1μAcm <sup>-2</sup>	0

**Total score <12→CR≤2**

**Total score ≥12→CR ≥ 3 → test at next boundary**

- 1) Half-cell potential gradient is given more weight, then absolute half-cell potential and the corrosion current value, as the later are considered as less reliable.

Abbildung 3-2 Punktesystem zur Zustandsbewertung aufgrund von Bewertungskriterien für Testmethoden [Lay2003]

Praktische Untersuchungen zur Nutzung des Gradienten als Bewertungsmethode in [Steck2006] haben gezeigt, dass Gradienten unter 100 mV / m als unkritisch einzustufen sind, während bei steigenden Gradientenwerten über 100 mV / m mit einer steigenden Korrosionswahrscheinlichkeit zu rechnen ist. Am Beispiel einer wassergesättigten Bodenplatte wurde der Informationsgewinn durch Gradientenberechnung bestätigt. Die Potentialwerte der Bodenplatte wiesen eindeutig auf eine hohe Korrosionswahrscheinlichkeit hin. Die abgeleiteten Potentialgradienten lagen hingegen in Wertebereichen, die als unkritisch anzusehen waren. Letztlich wurde bei der Freilegung der Bewehrung keine Korrosion der Bewehrung festgestellt. Der Beton der Bodenplatte war lediglich so weit wassergesättigt, dass Sauerstoffarmut an der Bewehrung vorlag, die **zu sehr tiefen, aber in der Fläche gleichmäßigen Potentialen geführt hat.**

Im Rahmen dieser Arbeit [Steck2006] wurde eine Methodik entwickelt, die Zustandsbewertung durch einen Entscheidungsbaum zu systematisieren (Abbildung 3-3) und durch ein Notensystem (siehe Tabelle 2) zu beschreiben.

*Zitat: „Mit Hilfe dieses Entscheidungsbaums kann der Zustand des Bauteils bzw. Bauwerks „mathematisch“ erfasst und bewertet werden. Außerdem können die einzelnen Prüfmethode zielgerichtet eingesetzt werden. Das Vorgehen entspricht damit im Prinzip der einheitlichen Schadensbewertung, die der Bundesverkehrsminister für z.B. Brücken in der RI-EBW-PRÜF vorgibt. Die Zustandsbewertung mit Hilfe eines solchen Entscheidungsbaums ermöglicht gerade bei vielen Bauwerken ein wirtschaftliches Instandsetzungsmanagement. Es bleibt aber zu betonen, dass ein sachkundiger und erfahrener Planer im Prinzip „unbewusst“ nichts anderes bei der Bauwerksdiagnose durchführt.“*

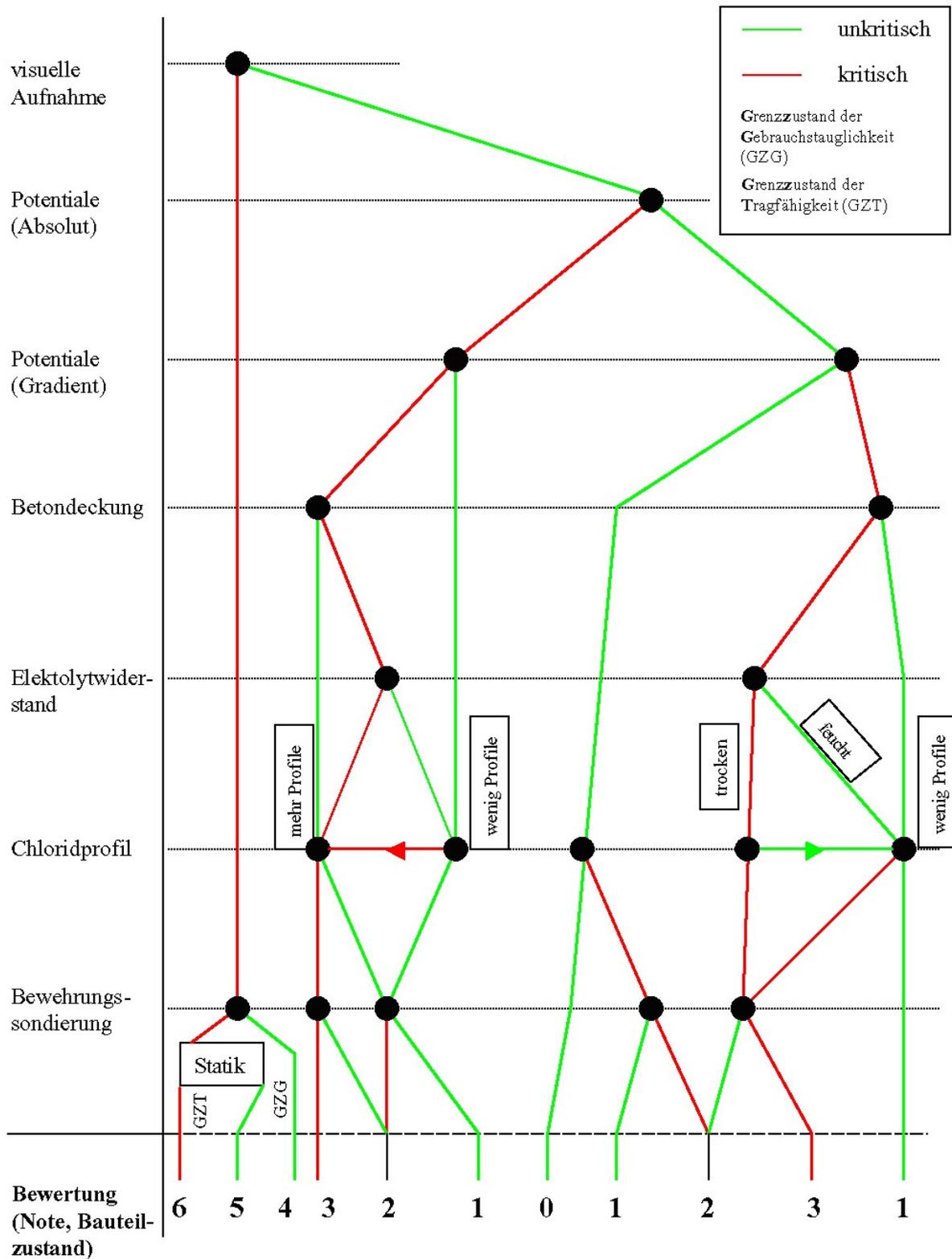


Abbildung 3-3 Entscheidungsbaum zur Bewertung von Ergebnissen der Bauwerksdiagnose [Steck2006], [Lay2003] mit Zustandsnoten gemäß Tabelle 2

Je mehr kritische Indizien sich bei einer Untersuchung darstellen, umso schlechter wird die Zustandsnote. Tabelle 2 beschreibt den Zustand, der durch die Zustandsnote repräsentiert wird.

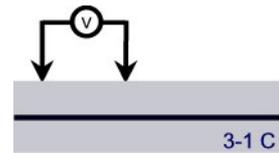
Tabelle 2 Zustandsnoten (des Entscheidungsbaums) zur Bewertung chloridbelasteter Bauteile in Anlehnung an [Steck2006], [Lay2003]

Zustandsnote	Zustandsbeschreibung
0	Bewehrung ist durch die Eigenschaften des Betons (Betondeckung, Alkalität, Beschichtung, Dichtheit, Zusammensetzung, Qualität, usw.) vor Korrosion geschützt.
1	Einleitung der Schädigung: Ein oder mehrere Schutzmechanismen sind nicht aktiv; es liegt aber noch kein direkter Angriff vor. Chlorideintrag über Oberfläche und Karbonatisierung der Betondeckung beginnt.
2	Stahl ist angreifbar, da ein oder mehrere Schutzmechanismen gänzlich fehlen; Risse erreichen die Bewehrung; Betondeckung ist karbonatisiert und/oder Chloride in größerer Konzentration befinden sich in Nähe der Bewehrung.
3	Stahl korrodiert (Loch- und Muldenfraßkorrosion, Flächenkorrosion), wobei dieser Vorgang an der Betonoberfläche nicht zu sehen ist; die Korrosionsbereiche können durch Potentialfeldmessung unter Einbezug von äußeren Einflüssen lokalisiert werden; der Querschnittsverlust des Stahls ist gering.
4	Es treten erste äußere Schadensbilder (Abplatzungen, Risse durch Volumenvergrößerung des Korrosionsproduktes) auf; signifikante Querschnittsverluste an der Bewehrung stellen sich ein.
5	Klare Schadensbilder an der Betonoberfläche sind erkennbar (Abplatzungen, Korrosionsverlaufsspuren an Rissen, Verfärbungen am Beton, Betongefüge löst sich auf usw.); deutliche Querschnittsverluste; Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit (Verkehrssicherheit) .
6	Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Bauteils; erhebliche Querschnittsverluste der Bewehrung.

Durch den Entscheidungsbaum wird deutlich, dass (berechnete) Gradienten sowohl bei unkritischen wie bei kritischen Potentialwerten das höherwertige Kriterium zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für aktive Korrosion darstellen, da sie in beiden Fällen eine Auf- oder Abwertung der Zustandsnote bewirken können.

Auch wird deutlich, dass die Verfahrenskombination mit der Messung der Betondeckung und der indirekten Bestimmung der Bauteilfeuchte über die Messung des elektrolytischen Betonwiderstands zur ganzheitlichen Betrachtung des Bauwerks notwendig ist. Letztendlich runden stichprobenartige, zerstörende Prüfungen zur Chloridkonzentrationsbestimmung, die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und visuelle Kontrollen durch Freilegen der Bewehrung eine vollständige Untersuchung ab.

Einen Ansatz zur Differenzpotentialfeldmessung verfolgt das Institut für Bauforschung (IBAC) in Aachen. Dort befindet sich die sogenannte Delta-Sonde (Abbildung 3-4 A) in der Entwicklung [Reichling2010].



Die Methode beruht auf der Messung der Differenzspannungen zwischen zwei von insgesamt drei gemäß Abbildung 3-4 B angeordneten Radelektroden und Berechnung und Darstellung eines resultierenden Spannungsvektors (Abbildung 3-4 C), der nach Orientierung und Länge die Steilheit eines vorhandenen Potentialtrichters lokal abbildet. Werden die Einzelmesspunkte kartiert (Abbildung 3-4 D), ergibt sich eine flächige Abbildung der Spannungsgradienten. Ziel der Forschung ist es, über diese Gradientenverteilung auf das Potentialfeld rückzuschließen und korrosionsaktive Bereiche schnell und sicher zu lokalisieren.

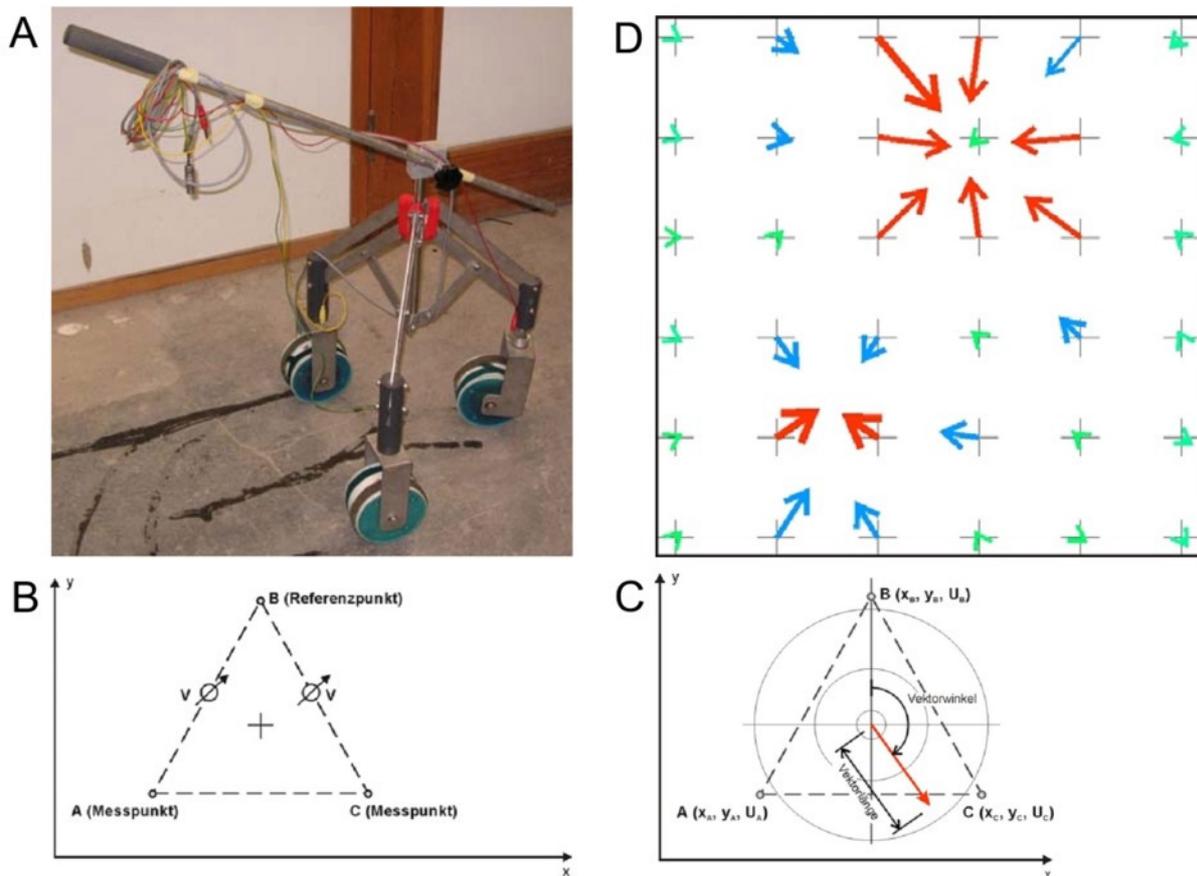


Abbildung 3-4 A: Prototyp der Delta-Sonde mit drei Radelektroden, B: Messanordnung, C: Vektordarstellung eines Einzelmesspunktes, D: Vektorfeld zur Bestimmung lokaler Korrosionsaktivitäten [Reichling2010]

### 3.1.2 Korrosionsdetektion mit anderen ZfP-Verfahren

Die galvanostatische Pulsmessung eignet sich insbesondere für Bereiche, in denen die Potentialmessung keine eindeutigen Ergebnisse zum Bewehrungszustand liefert oder eine weitere Verifikation im Hinblick auf die Korrosionswahrscheinlichkeit gewünscht wird. Hierzu wird während oder nach einer Kleinsignalerregung die Systemantwort registriert und aus

dieser Rückschlüsse auf den Zustand des Systems abgeleitet. Hierbei wird der Umstand ausgenutzt, dass ein aktiv korrodierendes System den Entzug von Elektronen über eine Außenschaltung (anodischer Stromimpuls) sehr schnell durch die Freisetzung weiterer Elektronen (Korrosionsreaktion) ausgleichen kann. Dies ist in einem passiven Zustand der Bewehrung nicht möglich, da die Korrosionsgeschwindigkeit um Größenordnungen geringer ist.

Im Gegensatz zur rein passiven Potentialfeldmessung wird bei der galvanostatischen Pulsmessung ein kurzzeitiger (3 bis 30 s) anodischer Gleichstromimpuls (Rechteckimpuls im einstelligen mA-Bereich) über eine Gegenelektrode an der jeweiligen Messstelle der Bewehrung aufgeprägt (Abbildung 3-5A). Die Größe des Gleichstromimpulses kann an die Bedingungen des Messobjektes angepasst werden. Gleichzeitig wird die dadurch hervorgerufene Änderung des Potentials registriert.

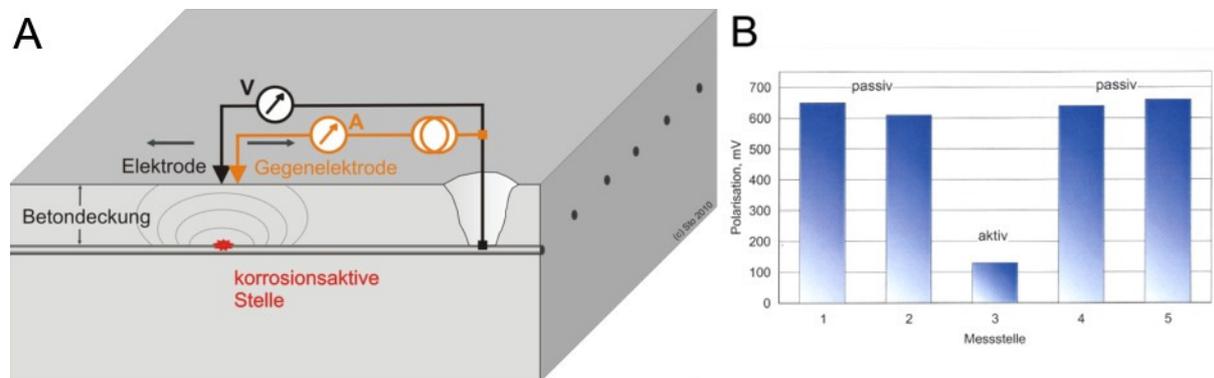


Abbildung 3-5 A: Schematischer Messaufbau der galvanostatischen Pulsmessung, B: Ergebnis einer galvanostatischen Pulsmessung [Mietz2004].

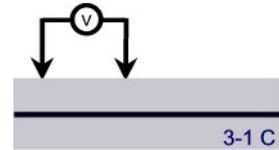
Wird an einer Messstelle eine Verschiebung des Potentials um mehrere 100 mV in anodischer Richtung beobachtet, dann ist die Bewehrung im Bereich der Messstelle passiv (Abbildung 3-5 B). Wird unter gleichen Bedingungen nur eine deutlich geringere Verschiebung festgestellt, dann ist in diesem Bereich mit aktiver Korrosion an der Bewehrung zu rechnen [Mietz2004].

Für die galvanostatische Pulsmessung ist keine automatisierte Anwendung bekannt und aufgrund des höheren Zeitbedarfs je Messpunkt auch nicht zu erwarten. Zudem ist die Methode durch die notwendige Ankopplung an die Bewehrung nicht zerstörungsfrei.

In [Lai2010] wird eine Methode beschrieben, Korrosion mittels Radar zu detektieren. Hierbei wird die frequenzabhängige Dispersion der elektromagnetischen Wellen ausgenutzt, die durch die Auswertung von Spektrum und Phasengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Korrosionszustand beobachtet werden kann. Diese Methode ist noch in einem sehr frühen Forschungsstadium und basiert auf Erkenntnissen aus dem Bereich Radar der Geophysik [Maierhofer1998], [Hubbard2003], [Lai2006].

## 3.2 Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung)

Im Folgenden wird das neue Verfahren zur verbesserten, schnelleren und zerstörungsfreien Detektion von chloridinduzierter Korrosion beschrieben (Messanordnung entsprechend Abbildung 3-1 C).



Im Sinne einer vollkommen zerstörungsfreien automatisierten Prüfung, stellte sich die Frage, ob eine Möglichkeit besteht, gänzlich auf das Schleppkabel zum Bewehrungsanschluss oder zur ortsfesten zweiten Elektrode zu verzichten. Bei einer großen Fläche muss die Freilegung der Bewehrung ggf. mehrfach erfolgen, und auch die Handhabung des Schleppkabels ist hinderlich.

Die im vorangegangenen Kapitel 3.1 beschriebenen Ausführungen zur Verwendung des Gradienten als Bewertungskriterium mit der größeren Aussagesicherheit für Korrosionswahrscheinlichkeiten führten zu der Idee, die Differenzspannung zwischen den Rasterpunkten einer Messfläche direkt **zu messen, anstatt sie durch Berechnung aus Differenzen der Potentiale zu ermitteln.**

Als messtechnische Lösung bietet sich folgerichtig die Verwendung zweier oder mehrerer Elektroden an, zwischen denen lokale Differenzspannungen gemessen werden.

Für den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verfahrens ist letztendlich entscheidend, ob und welche Kriterien verwendet werden können, um eine aktive Korrosion detektieren zu können.

Es ist zu untersuchen, ob diese Differenzspannungen messbar sind und damit durch Integration, Differentiation oder ggf. durch einen signifikanten Signalverlauf auf eine Potentialfeldverteilung rückgerechnet bzw. rückgeschlossen werden kann.

Die Umsetzung der automatisierten Anwendung wird in Kapitel 5 beschrieben.

Zunächst folgen einige theoretische Überlegungen.

### 3.2.1 Betrachtung des Makroelements

Ob chloridinduzierte aktive Korrosion detektiert werden kann, hängt in hohem Maße davon ab, ob ein ausreichend hoher Korrosionsstrom im Makroelement (vgl. Kapitel 2.1.1.1) fließt. Dieser Strom erzeugt im Elektrolyten (Porenlösung des Betons) einen Spannungsabfall, dessen Größe von den elektrochemischen, elektrischen und auch von den geometrischen Eigenschaften des Elektrolyten, also von den Eigenschaften des Betons oberhalb der Bewehrungsstahls, abhängt. Die Form (Breite, Steigung und Größe des lokalen Minimums) des sich ausbildenden Potentialtrichters ist also unter anderem auch von der Betondeckung abhängig. Abbildung 3-6 zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild.

Aufgrund unterschiedlicher Potentiale zwischen der passiven Bewehrung (Kathode) und der aktiven Korrosionsstelle (Anode) fließt der Makroelementstrom  $I_k$  über die als Widerstände dargestellten Kontaktflächen (anodischer Polarisationswiderstand  $R_A$  und kathodischer Polarisationswiderstand  $R_K$ ) durch den Beton (Betonwiderstand  $R_B$ ) und durch den Stahl

(Widerstand des Stahls  $R_S$ ) zurück. Der Strom in diesem geschlossenen Stromkreis wird bestimmt durch die Spannungsdifferenz (dargestellt als Spannungsquelle  $U_0$ ) und die Reihenschaltung der elektrischen Widerstände.

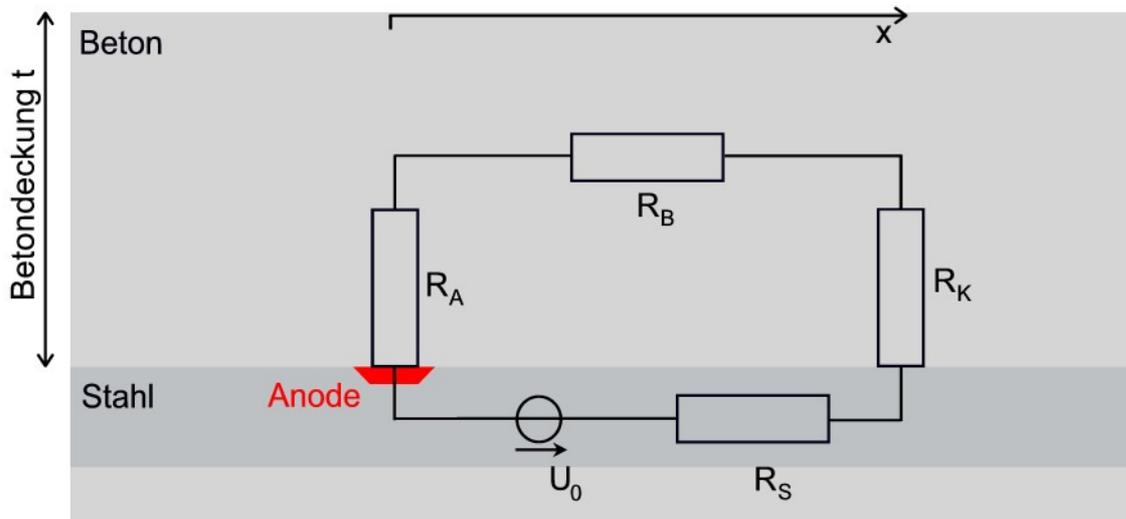


Abbildung 3-6 Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild der wirksamen Teilwiderstände

Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes lässt sich der Makroelementstrom  $I_K$  berechnen:

$$I_K = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_A + R_B + R_K + R_S} \quad (3)$$

Der Widerstand des Stahls  $R_S$  ist vernachlässigbar klein. Für die folgende Betrachtung wird die Annahme getroffen, dass auch die Polarisationswiderstände  $R_A$  und  $R_K$  klein gegenüber dem Widerstand des Betons  $R_B$  sind. Dieser lässt sich näherungsweise gemäß Gleichung (4) aus dem spezifischen Widerstand  $\rho$  und den Abmessungen  $s$  und  $d$  berechnen.

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi \cdot s} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot s}{d}\right) \quad (4)$$

Der gesamte Strom fließt somit (theoretisch) nur durch Widerstand des Betons (Gleichung (5)), der Gesamtwiderstand ist näherungsweise etwas kleiner und der Spannungsabfall größer als in der Realität.

$$I_K \approx \frac{U}{R_B} \quad (5)$$

Im Bereich der Anode treten die größten Stromdichten auf. Die örtliche Verteilung der Spannung  $U$  am Messpunkt  $x$  über der Anode (im Folgenden als Spannungstrichter bezeichnet) kann für eine stabförmige Anode der Länge  $s$  mit dem Durchmesser  $d$  entsprechend Gleichung (6) berechnet werden [Baeckmann1989][Büchler2007], wobei der Korrosionsstrom  $I_K$ , der spezifische Betonwiderstand und die Betonüberdeckung  $t$  in die Berechnung eingehen.

$$U(x) = \frac{I_K \cdot \rho}{2\pi \cdot s} \cdot \ln \frac{\sqrt{\left(t + \frac{d}{2}\right)^2 + x^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} + \frac{s}{2}}{\sqrt{\left(t + \frac{d}{2}\right)^2 + x^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} - \frac{s}{2}} \quad (6)$$

Fasst man die Gleichungen (4),(5) und (6) zusammen, so ergibt sich Gleichung (7).

$$U(x) = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{2 \cdot s}{d}\right)} \cdot \ln \frac{\sqrt{\left(t + \frac{d}{2}\right)^2 + x^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} + \frac{s}{2}}{\sqrt{\left(t + \frac{d}{2}\right)^2 + x^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} - \frac{s}{2}} \quad (7)$$

Abbildung 3-7 gibt den Verlauf der Spannungstrichter für einige Kombinationen aus Betondeckung, Anodenlänge und Spannungsquelle  $U_0$  beispielhaft wieder.

Die Abbildung 3-7 macht deutlich, dass kleine Anoden mit großer Betondeckung und kleiner Potentialdifferenz  $U_0$  schwer zu detektieren sind, da das Spannungsminimum kaum messbar ist und aufgrund der Spannungswerte größer als -200 mV nicht als korrosionsaktiv bewertet würden (vgl. Abbildung 2-5). Selbst bei geringeren Betondeckungen ist eine Detektion von Anoden nicht wahrscheinlich, wenn das Messraster zu groß gewählt wurde, da auch die Spannungstrichterbreite (Definition siehe folgendes Kapitel 3.2.2) gering ist.

Je tiefer ein Korrosionsherd liegt, desto geringer wird die Steigung des Spannungstrichters und umso breiter wird seine laterale Ausdehnung. So besteht auch hier die Gefahr, dass eine korrosionsaktive Anode übersehen wird.

Es zeigt sich, warum über die Bewertung mit absoluten Potentialwerten keinerlei Aussagen über einen Korrosionszustand möglich sind, insbesondere wenn man bedenkt, dass ca. 90% aller in der Praxis gemessenen Werte im Bereich von -150 bis -350 mV liegen.

Die Bewertung des Korrosionszustandes nach absoluten Potentialwerten (vgl. Kapitel 2.2.1 und 3.1.1) kann offensichtlich nicht zu einer richtigen Einschätzung führen, wenn die Betondeckung am Ort des lokalen Spannungsminimums unbekannt ist.

Die eigentliche Zielgröße, der Korrosionsstrom  $I_K$ , dessen Größe durch die Potentialfeldmessung indirekt quantifiziert werden soll, ist nicht ohne die Kenntnis über die Eigenschaften des umgebenden Betons möglich.

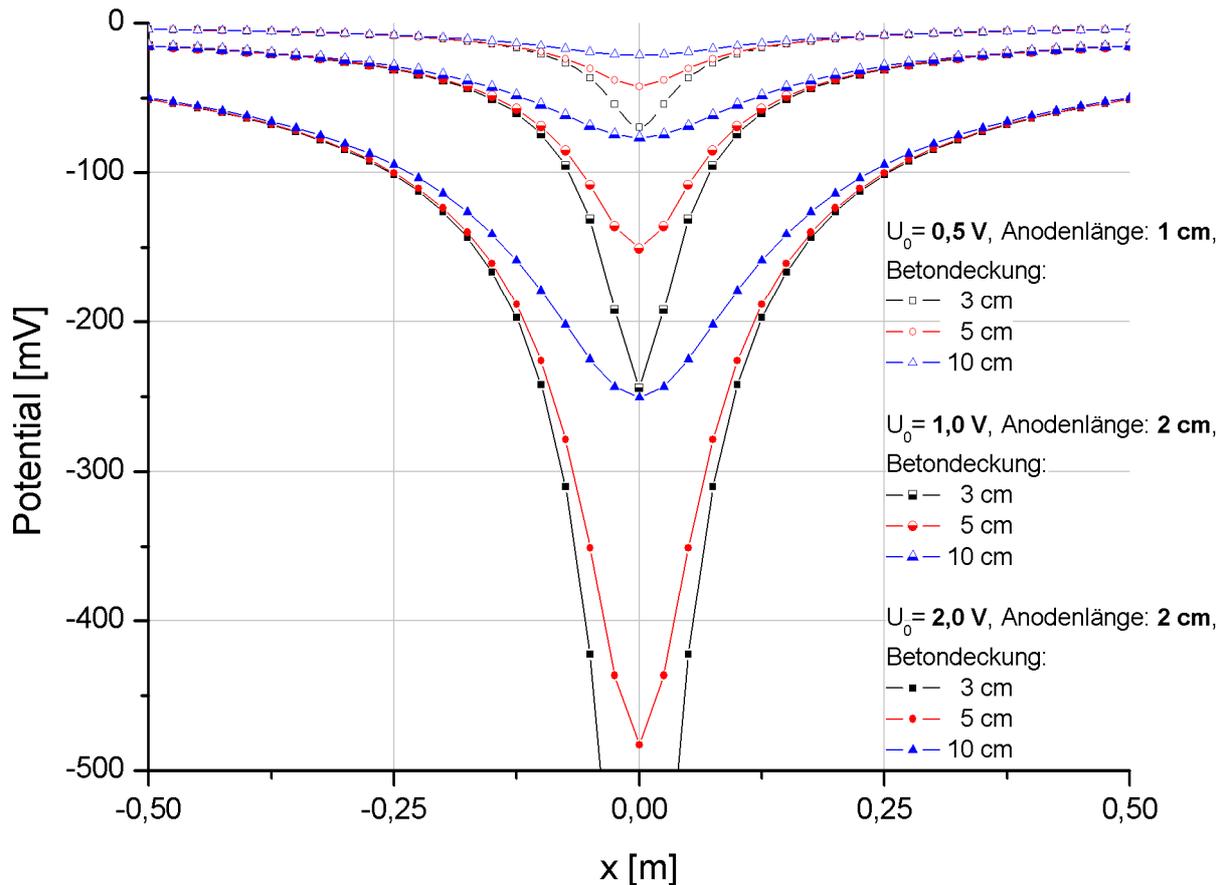


Abbildung 3-7 Berechnete Potentiale auf der Betonoberfläche gegen eine ferne Referenzelektrode bei Variation der Anodenlänge  $s$ , der Betondeckung  $t$  und der Potentialdifferenz  $U_0$

Die hier getroffenen starken Vereinfachungen setzen aber voraus, dass Anode und Kathode unendlich weit voneinander entfernt sind und der Beton einen unendlich ausgedehnten Halbraum bildet. Untersuchungen in [Büchler2007] zum Vergleich dieser Annahme zwischen Berechnungen und realen Probekörpern mit künstlichen Anoden ergaben allerdings eine gute Übereinstimmung.

### 3.2.2 Definition der Spannungstrichterbreite

Das vorige Kapitel zeigt, dass die Form des Potentialtrichters von mehreren Parametern abhängt. Zur Vergleichbarkeit der Spannungstrichter und als Kriterium zur Detektierbarkeit wird die Halbwertsbreite verwendet. Die Halbwertsbreite  $b$  ist definiert als die Distanz, bei der ein Funktionswert (hier das Potential) auf die Hälfte seines Maximums (hier lokales Minimum  $U_{\min}$ ) abgefallen ist (Abbildung 3-8).

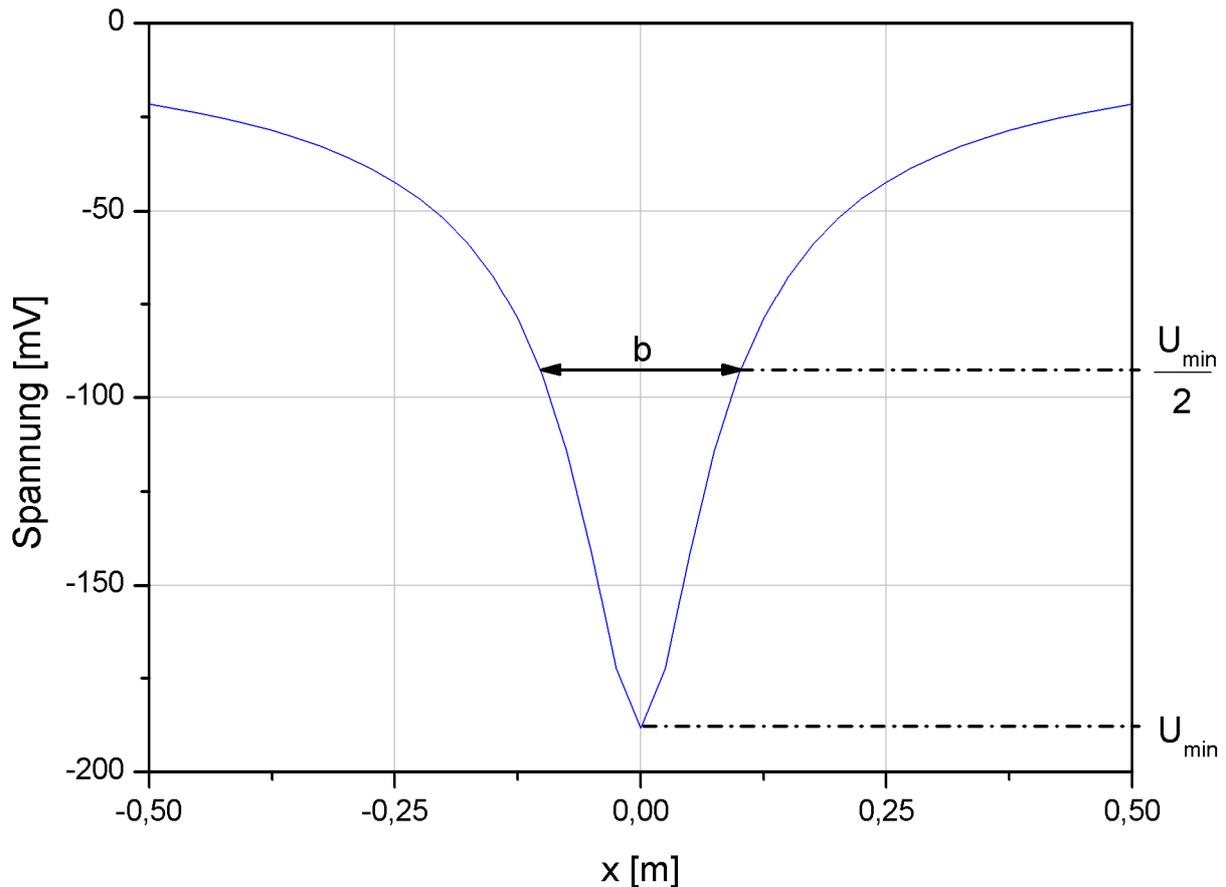


Abbildung 3-8 Halbwertsbreite  $b$  eines Spannungstrichters

In [Büchler2007] wird folgende sinnvolle Festlegung für die Detektierbarkeit eines Spannungstrichters getroffen, Zitat: „Aufgrund der typischerweise beobachteten Streuung in den Potenzialwerten von ca. 50 mV muss diese halbe Maximalhöhe  $U_{min} / 2$  mindestens 50 mV betragen, damit eine Detektion möglich ist. Daraus folgt, dass die maximale Spannung mindestens 100 mV betragen muss.“ Gemeint sind die Absolutwerte der Messspannungen. Damit ein Spannungstrichter der Halbwertsbreite  $b$  lokalisiert werden kann, muss das verwendete Messraster kleiner als die zu erwartende Halbwertsbreite  $b$  sein.

### 3.2.3 Integration der Differenzpotentiale

Eine typische Potentialfeldverteilung, wie sie in Anwesenheit eines idealen punktförmigen korrosionsaktiven Bereiches auftreten würde, wurde wie in Kapitel 3.2.1 für eine Orientierung dargestellt (in Anlehnung an [Baeckmann1989] [Miltzer1985]) und für eine Fläche berechnet (Abbildung 3-9 A). Die Verteilung der Isolinien gleichen Potentials als Projektion auf die Oberfläche, wie man sie auch bei einer Messung ermitteln würde, zeigt der untere Teil der Grafik. Abbildung 3-9 B zeigt den Gradienten dieser Potentialverteilung entlang einer Koordinatenachse.

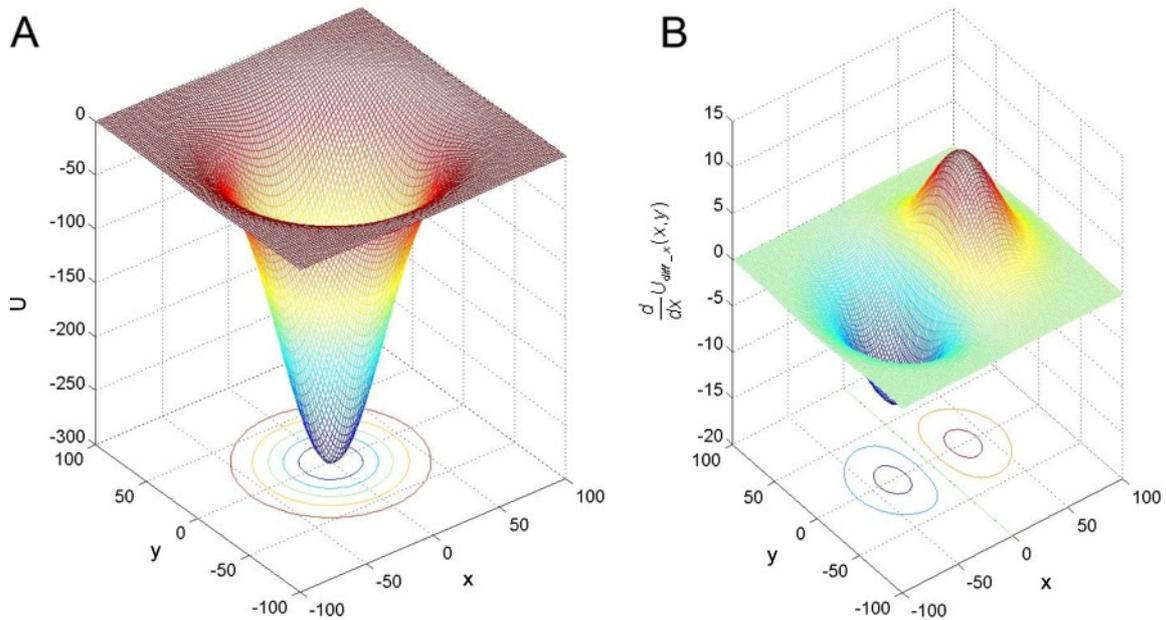


Abbildung 3-9 A: Angenommene ideale Potentialverteilung an der Messoberfläche über dem Zentrum einer punktförmigen korrosionsaktiven Stelle, B: X-Komponente des Gradienten der Potentialfeldverteilung (alle: Skalierung willkürlich)

Aus einer realen Messung an einem Bauteil mit korrosionsaktiven Bereichen lassen sich damit lokale Differenzspannungen errechnen, wie sie an der Oberfläche des Bauteils auftreten müssten. **Der Ansatz besteht nun darin festzustellen, ob dieser Zusammenhang auch messtechnisch umkehrbar ist.** Wie kann also durch die Messung der lokalen Differenzspannungen auf die Potentialfeldverteilung ( $U_{Pot}$ ) geschlossen werden?

Mathematisch ist dies darstellbar als eine Integration über die Gesamtheit der Differenzspannungen  $U_{diff}(x,y)$  entlang eines Pfades mit den Komponenten  $U_{diff\_x}(x,y)$  und  $U_{diff\_y}(x,y)$  von einem gewählten Referenzpunkt  $(x_0,y_0)$  mit der Offsetspannung  $U_0$  bis zum jeweiligen Messpunkt  $(x,y)$  gemäß Gleichung (8).

$$U_{Pot}(x,y) = \int \frac{U_{diff\_x}(x,y)}{\Delta x} dx + \int \frac{U_{diff\_y}(x,y)}{\Delta y} dy + U_0(x_0,y_0) \quad (8)$$

Die Schrittweiten  $\Delta x$  und  $\Delta y$  werden für die theoretische Betrachtungen als infinitesimal angenommen. Für eine reale Messung werden sie durch den Abstand  $w$  der Referenzelektroden (siehe Kapitel 3.2.5) repräsentiert bzw. durch Interpolation in ein feineres gleichförmiges Raster (engl. „Grid“) überführt. Abbildung 3-10 zeigt den Integrationspfad vom Referenzpunkt  $U_0$  bis zu einem beliebigen Messpunkt  $(x,y)$ .

Entscheidend für die Auswertung ist, dass die Messspuren parallel zueinander und mit der gleichen Orientierung aufgenommen werden. Für die Querverbindung, um von einer Messspur zur nächsten zu gelangen, reicht theoretisch eine Messspur, die orthogonal zur

ersten Orientierungsrichtung verläuft, aus. In der Praxis wird man sicherheitshalber mehrere orthogonale Messspuren aufnehmen.

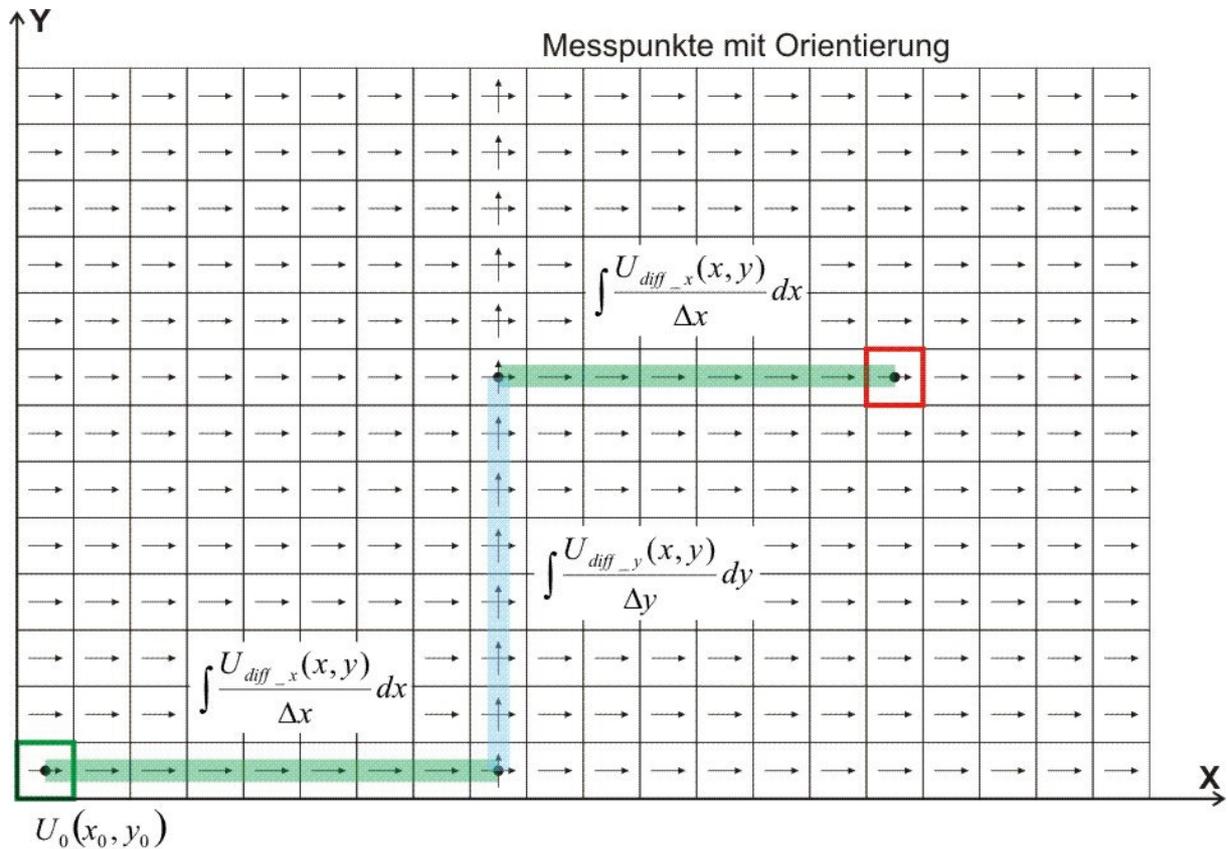


Abbildung 3-10 Integrationspfad vom Referenzmesspunkt  $U_0$  (grünes Quadrat) zum Messpunkt (rotes Quadrat), die Pfeile symbolisieren die ermittelten Gradienten als Vektoren

Gelingt es messtechnisch eine Referenzspannung  $U_0$  durch eine einmalige Messung des Potentials gegen die Bewehrung zu ermitteln, so kann aus den Differenzspannungen durch Integration das Potentialfeld rekonstruiert werden (vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 3.1, [Büchler2007]).

In diesem Fall kann die Bewertung der Differenzpotentialfeldmessung **auf der gleichen Entscheidungsgrundlage** wie bei der Potentialfeldmessung vorgenommen werden.

Für die mathematische Berechnung wurde in der Programmiersprache [Matlab] ein Skript angefertigt, das die ortsreferenziert aufgenommenen Differenzspannungen integriert. Alle folgenden flächigen Darstellungen wurden damit berechnet.

### 3.2.4 Gradient der Differenzpotentiale

Stellt man die Potentialverteilung der Abbildung 3-9 A als Vektoren dar, deren Länge und Orientierung dem Gradienten entsprechen, so ergibt sich die vektorielle Darstellung in Abbildung 3-11.

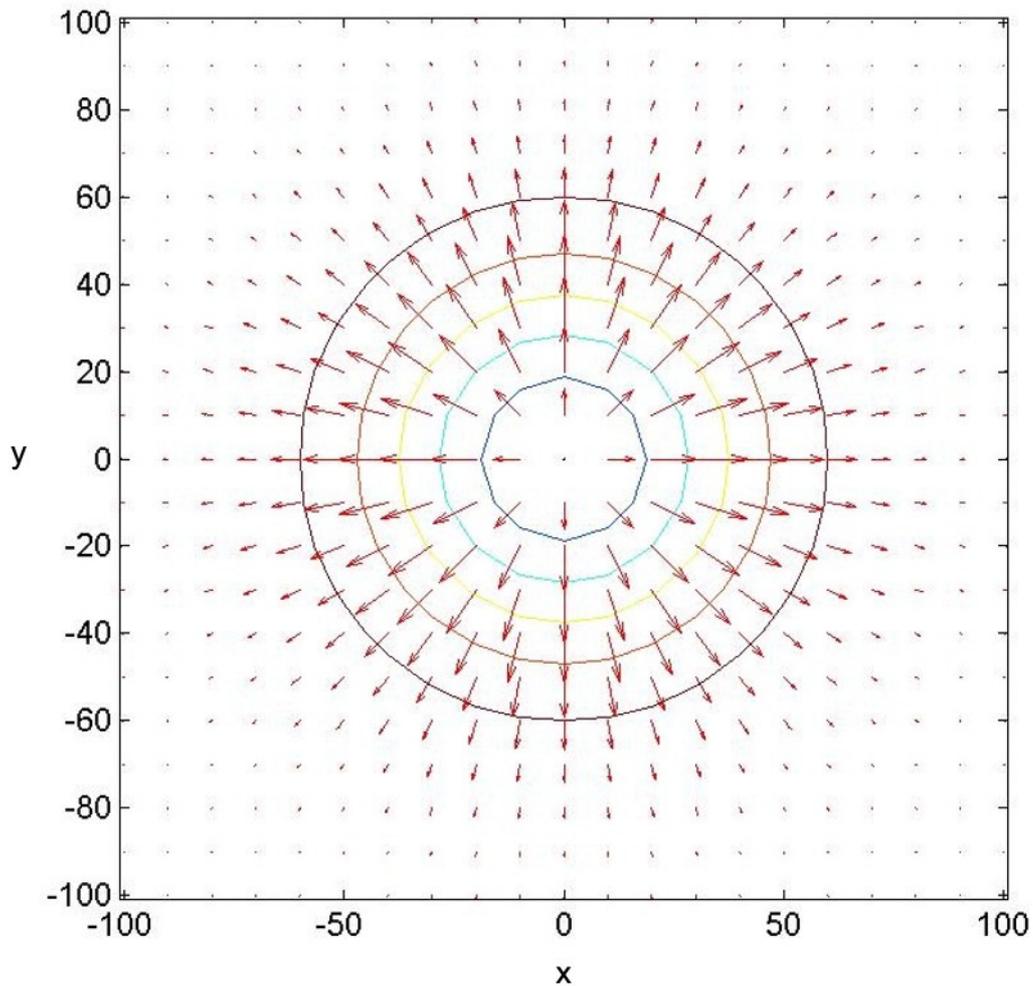


Abbildung 3-11 Gradient der Potentialfeldverteilung in vektorieller Darstellung, die Pfeile zeigen in die positive Richtung der Steigung (Skalierung willkürlich)

Der Gradient  $g(x,y)$  aus den gemessenen Differenzpotentialen  $U_{\text{diff}}(x,y)$  errechnet sich je nach Orientierung des Elektrodenpaares durch

$$g_x(x,y) = \frac{U_{\text{diff}_x}(x,y)}{dx} \quad (9)$$

bzw.

$$g_y(x,y) = \frac{U_{\text{diff}_y}(x,y)}{dy} \quad (10)$$

Entlang horizontaler und dazu exakt orthogonaler vertikaler Messspuren wird nur je eine Komponente des Spannungsvektors gemessen werden. Gemeinsam bilden beide Komponenten den resultierenden Gradientenvektor  $g(x,y)$ . Es kann mit zwei Radelektroden nur eine Komponente des Gradientenvektors innerhalb einer Messspur bestimmt werden.

Ein weiterer hier nicht verfolgter Ansatz (siehe Ausblick, Kapitel 7.2) wäre es, drei Elektroden zu verwenden, mit denen beide Komponenten gleichzeitig bestimmt und vektoriell addiert werden könnten. Wie die Ausführungen zu den Messungen (siehe Kapitel 3.3) zeigen, ist dies nicht zwangsläufig notwendig.

In der Praxis teilt man die Differenzspannungswerte durch den Elektrodenabstand und erhält direkt den Spannungsgradienten einer Komponente, den man räumlich dem Mittelpunkt zwischen den beiden Elektroden zuweist.

Als Entscheidungsgrundlage für die Detektion von aktiver Korrosion dient das zuvor beschriebene Kriterium (vgl. Kapitel 3.1, [Steck2006]) von 100 mV / m bzw. 200 mV / m.

### 3.2.5 Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit durch die Differenzpotentialfeldmessung

Der Gradient einer Potentialfeldmessung führt rein rechnerisch zum gleichen Ergebnis wie der Gradient einer Differenzpotentialfeldmessung. Die Differenzpotentialfeldmessung hat aber aufgrund der Messung mit zwei Elektroden den entscheidenden Vorteil, dass sie bei der Wahl des richtigen Abstands der Radelektroden bei gleichem Messspurabstand eine höhere Detektionswahrscheinlichkeit auch für kleine Anoden ermöglicht.

Vergleichbar der Halbwertsbreite bei der Potentialfeldmessung als Detektionskriterium definiere ich eine **Gradientenbreite g** für die Differenzpotentialfeldmessung. Die Gradientenbreite g ist die Breite einer Gradientenkurve, bei der jeweils der Absolutwert von 200mV / m (vgl. hierzu Kapitel 3.1.1) über- bzw. unterschritten wird (Abbildung 3-12).

Den typischen Signalverlauf mit lokalem Minimum, Nulldurchgang und lokalem Maximum des Gradienten beim Schnitt durch einen Potentialtrichter bezeichne ich als **Gradientensignatur**. Ihre Bedeutung bei der Detektion von korrosionsaktiven Bereichen wird in Kapitel 3.2.6 erläutert.

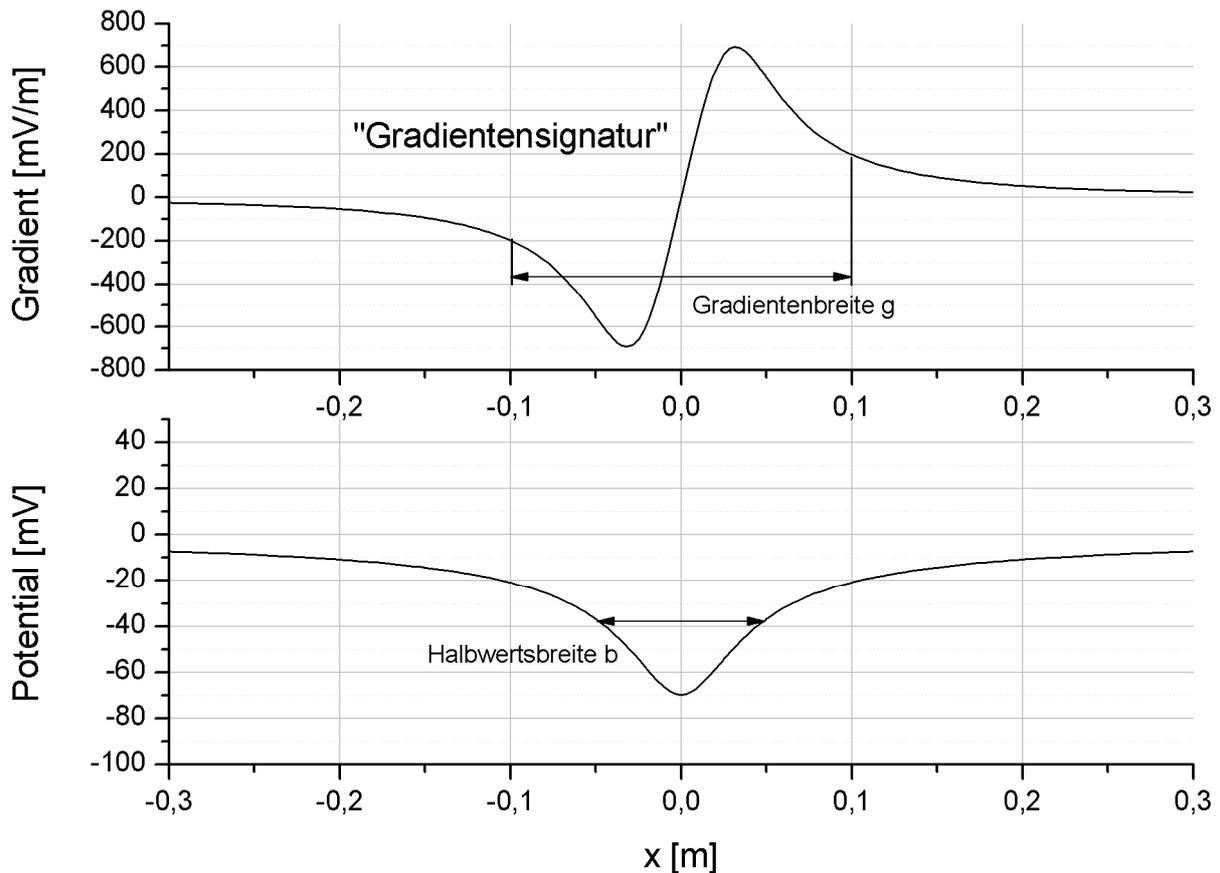


Abbildung 3-12 Definition der Gradientensignatur und Darstellung der Gradientenbreite  $g$  und der Halbwertsbreite  $b$  für die Gradienten der errechneten Potentiale bei einer Anodenlänge von 1 cm (vgl. Kapitel 3.2.1) und einer Betondeckung von 3 cm

Abbildung 3-13 zeigt deutlich, dass die Halbwertsbreiten für kleinere Betondeckungen geringer werden und damit die Detektionswahrscheinlichkeit bei einem fest gewählten Messraster abnimmt. Die Gradientenbreiten hingegen bleiben nahezu konstant und sind deutlich weniger abhängig von der Betondeckung als die Halbwertsbreiten. Sie sind bei den betrachteten Anodenlängen und Betondeckungen im Extrem ca. viermal größer als die Halbwertsbreiten.

Dies bedeutet einerseits, dass oberflächennahe Korrosionsherde bei der Verwendung des gleichen Messrasters verglichen mit einer Potentialfeldmessung mit einer höheren Wahrscheinlichkeit detektiert werden können. Andererseits besteht auch die Möglichkeit ein größeres Messraster verwenden zu können, das bei ähnlicher Detektionswahrscheinlichkeit Messzeit einsparen kann.

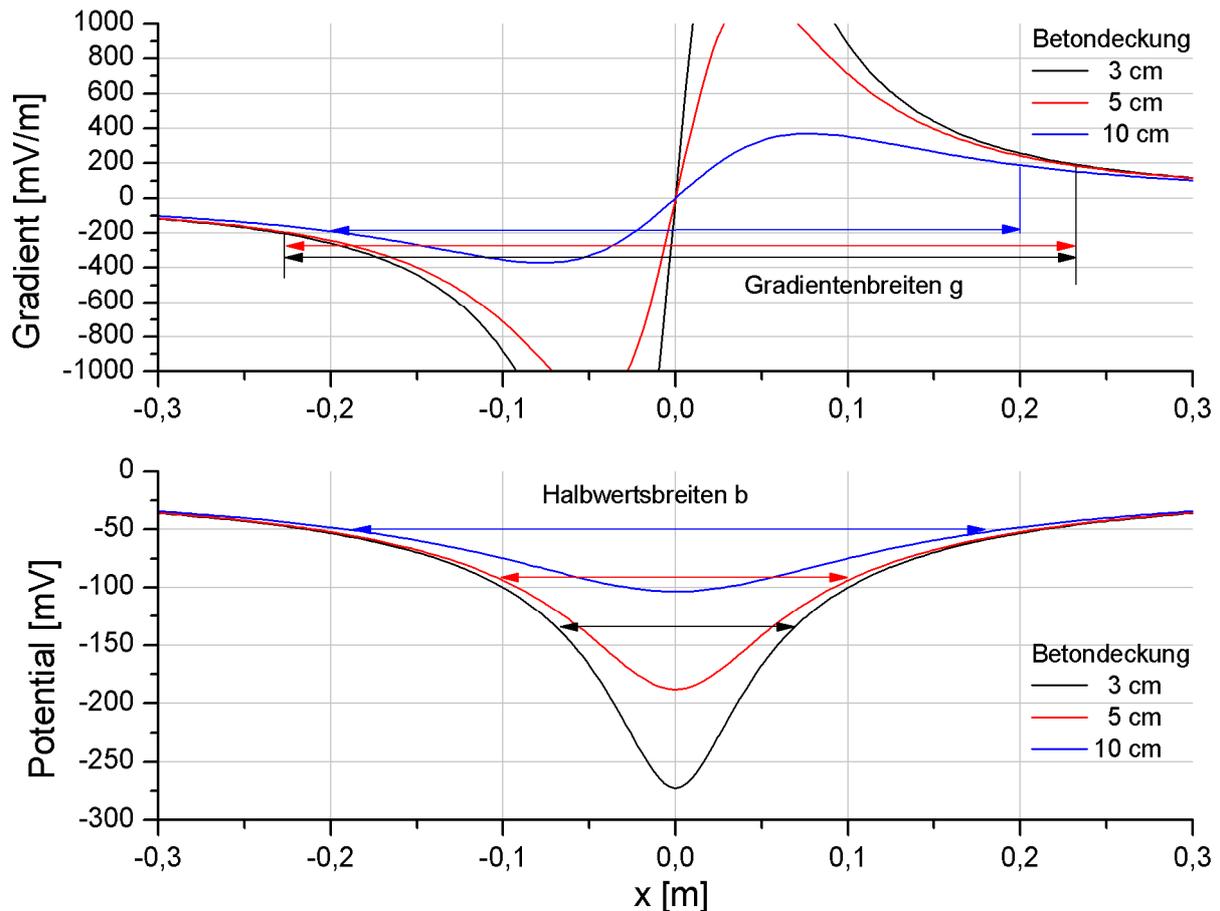


Abbildung 3-13 Vergleich der Gradientenbreiten und der Halbwertsbreiten für die Gradienten der errechneten Potentiale bei Variation der Betondeckung (vgl. Kapitel 3.2.1)

Für die Messung kommt es aber auf die Wahl des richtigen Abstands der (Rad-)elektroden und die richtige Orientierung der Elektroden in Bezug zur Messspurrichtung an.

Wieso dies so ist, zeigt Abbildung 3-14 anschaulich. Der äußere Kreis symbolisiert die Ausdehnung eines Spannungstrichters, der mit seinem Durchmesser der Gradientenbreite  $g$  (mittlerer Kreis) in etwa einem gewählten Messspurabstand  $m$  entspricht. Der innere Kreis symbolisiert die Ausdehnung der Halbwertsbreite  $b$ . Die Gradientenbreite wird als etwa dreimal so groß wie die Halbwertsbreite angenommen.

Bei einer Potentialfeldmessung wäre die Detektionswahrscheinlichkeit für das Auffinden des Spannungstrichters sehr gering. Hierzu müsste der Messspurabstand  $m$  in etwa der Größe der Halbwertsbreite  $b$  (also etwa  $m/3$ ) oder kleiner gewählt werden (vgl. Kapitel 3.2.2)

Positioniert man bei einer DP-Messung das Radelektrodenpaar in Fahrtrichtung (rotes Elektrodenpaar), so ergibt sich kein weiterer Informationsgewinn, auch hier würde der Spannungstrichter nicht lokalisiert werden. Die Detektionswahrscheinlichkeit ist jedoch um ein Drittel höher, da es zur Detektion des Spannungstrichters nur notwendig ist, diesen innerhalb seiner Gradientenbreite  $g$  zu durchqueren (beliebige Orientierung der Sekante).

Orientiert man die Radelektroden quer zur Messspurrichtung (grünes Elektrodenpaar) und wählt man den Elektrodenabstand  $a$  halb so groß wie den Messspurabstand  $m$ , so vergrößert sich die Detektionswahrscheinlichkeit nochmals um den Faktor 2.

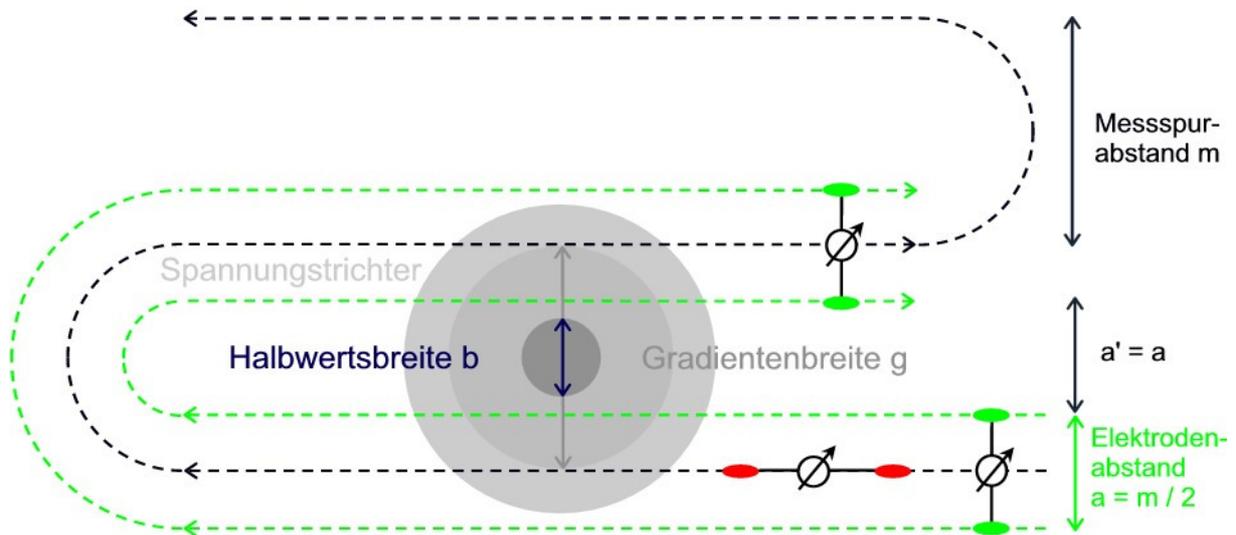


Abbildung 3-14 Abstand und Anordnung der Radelektroden zur Messspurrichtung zur Detektion eines idealisierten Spannungstrichters der Halbwertsbreite  $b$  und der Gradientenbreite  $g$  im Messspurabstand  $m$

Folglich kann die **Detektionswahrscheinlichkeit einer DP-Messung** mit der beschriebenen Konfiguration der Elektroden als etwa **sechsmal größer angenommen werden** als bei einer Potentialfeldmessung gleichen Messspurabstands.

Damit wird auch der wesentliche, praxisrelevante Unterschied zwischen berechneten und gemessenen Gradienten deutlich.

In der Praxis orientiert sich bei einer Potentialfeldmessung der Messspurabstand an der zu erwartenden Halbwertsbreite (siehe hierzu auch Kapitel 4.2).

Bei der DP-Messung orientiert sich in erster Linie der Elektrodenabstand an der zu erwartenden Gradientenbreite. Im folgenden Kapitel 3.2.6 wird deshalb die Ermittlung eines idealen Elektrodenabstands beschrieben.

### 3.2.6 Festlegung des Elektrodenabstands

Die Wahl eines geeigneten Abstands der beiden Messelektroden hängt davon ab, mit welcher Wahrscheinlichkeit auch kleine Anoden detektiert werden können. In Abbildung 3-15 ist ein idealisierter, normierter Potentialfeldverlauf der Halbwertsbreite  $b=1$  mit der minimalen Spannung  $U=1$  als hellblaue Fläche eingezeichnet (vgl. auch Kapitel 3.2.2).

Bei den farbigen Messwertverlaufskurven im selben Diagramm wurde der Abstand zwischen beiden Elektroden bei der gedachten „Überfahrt“ über das Potentialfeld variiert: Die schwarze Kurve weist dem Abstand genau die Halbwertsbreite des Potentialfeldes zu, die

gestrichelte Kurve zeigt einen Abstand der doppelten Halbwertsbreite, die violette Kurve die vierfache Halbwertsbreite.

Aufgrund der angenommenen Symmetrie des Potentialfeldes ergeben sich alle Spannungsdifferenzen bei genauer Positionierung des Elektrodenpaares exakt über dem Ursprung (0/0). Die Maxima der jeweiligen Spannungsverläufe nehmen zunächst mit steigendem Abstand deutlich zu, die Position ändert sich nur wenig. Bei einem Abstand, der genau der doppelten Halbwertsbreite entspricht, wird auch das normierte Maximum der Messspannung erreicht. Mit noch größer werdendem Abstand kann die Spannungsdifferenz nicht größer werden (Subtraktion des Potentialwertes mit Null), es flacht jedoch der Bereich zwischen den Maxima zu einem Null-Plateau ab (graue und violette Kurve).

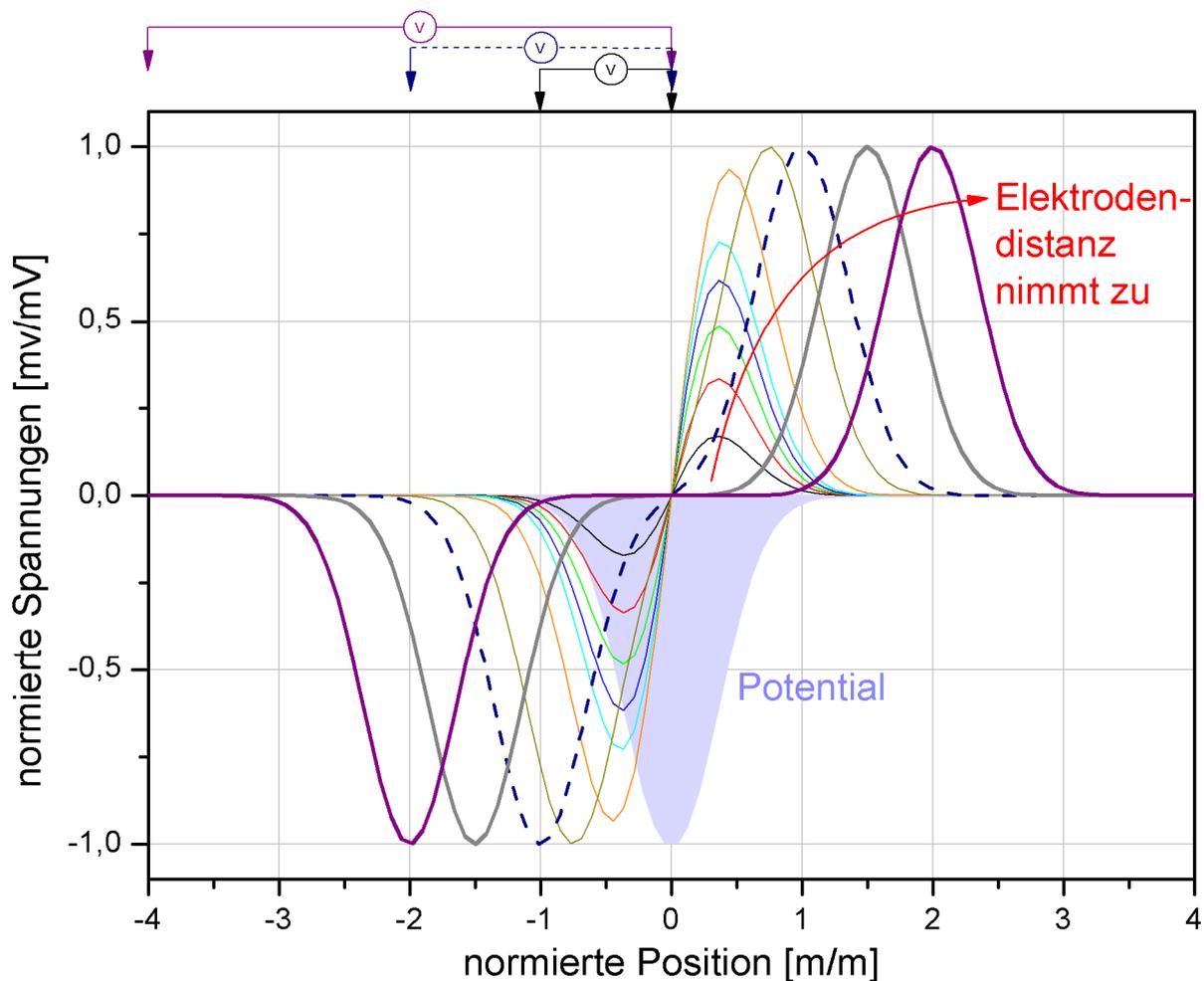


Abbildung 3-15 Diagramm mit Spannungsverläufen bei Variation des Elektrodenabstands auf der Basis eines normierten, idealisierten Potentialfeldverlaufs der Halbwertsbreite 1 (hellblau)

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass im realen Fall einer Messung mit **konstantem** Elektrodenabstand Bereiche mit unterschiedlich breitem Potentialtrichter unterschiedlich gut detektiert werden können. Abbildung 3-16 verdeutlicht dies.

Im Falle  $a > w$  werden „Eintritt“ und „Austritt“ aus dem Bereich eines Potentialtrichters, also lokales Minimum und Maximum, auseinander liegen und ein Null-Plateau dazwischen abbilden. Der absolute Differenzspannungswert des Minimums und des Maximums

entspricht aber bis zur Breite des Potentialtrichters  $a=w$  dem maximal zu ermittelnden Potentialwert einer Differenzanordnung (zweite Referenzelektrode fernab). Je größer die Breite des Potentialtrichters im Verhältnis zum Elektrodenabstand wird ( $a < w$ ), umso kleiner sind die ermittelten Spannungswerte. Der Abstand zwischen Minimum und Maximum bleibt aber konstant und entspricht dem Elektrodenabstand  $a$ .

Das Minimum des Potentialtrichters ist in allen Fällen räumlich dem Mittelpunkt  $a/2$  zwischen den beiden lokalen Extremwerten zuzuordnen.

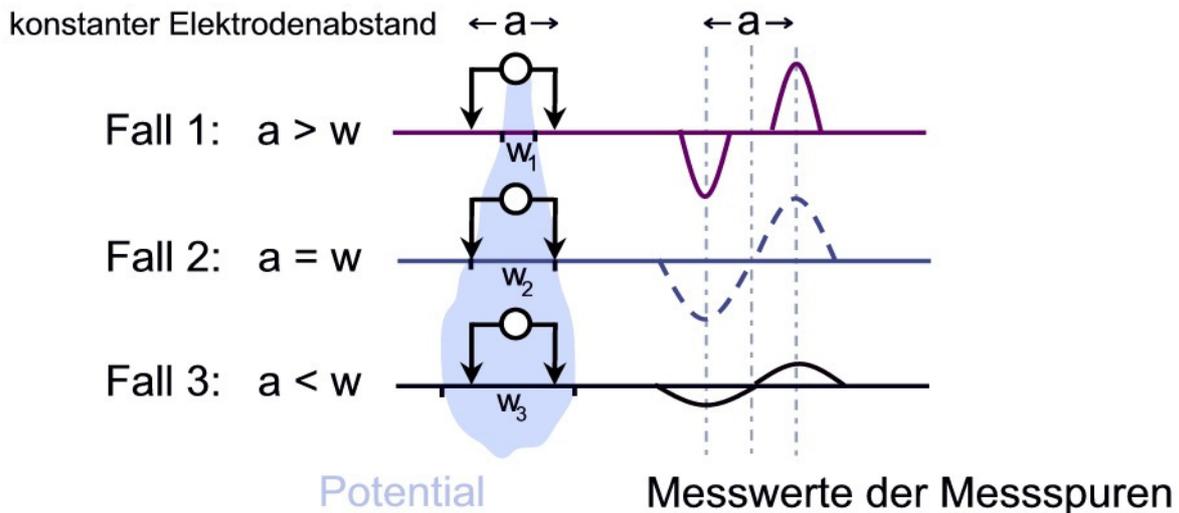


Abbildung 3-16 Skizzierung der typischen Messwertverläufe bei Überfahrt mit konstantem Elektrodenabstand  $a$  bei Variation der Halbwertsbreite (Farben gemäß Abbildung 3-15)

Für eine reale Messung folgt aus den theoretischen Überlegungen, dass die Messspurbreiten und Elektrodenabstände der Messaufgabe angepasst werden müssen. Bei der Überfahrt über einen korrosionsaktiven Bereich scheint zudem der Minimum-Maximum Übergang ein geeignetes signifikantes Muster zu sein, um lokale Potentialminima schnell zu erkennen. Ich bezeichne dies im Folgenden als **Gradientensignatur**. Dabei entspricht der Abstand zwischen Minimum und Maximum dem gewählten Elektrodenabstand  $a$ .

Die Orientierung der Messspuren ist im Fall von idealisierten, punktförmigen korrosionsaktiven Bereichen nicht relevant. Hier ist entscheidend, dass der Messspurabstand klein genug gewählt wird, damit der Bereich der Gradientenbreite durchfahren wird (vgl. vorhergehendes Kapitel 3.2.5).

Im Fall von größer ausgedehnten korrosionsaktiven Bereichen ist eine Abtastung der Messfläche mit orthogonalen Fahrspuren notwendig, um den „Eintritt“ in den und den „Austritt“ aus dem Bereich der Gradientenbreite erkennen zu können. Im Fall von chloridinduzierter Lochfraßkorrosion ist jedoch nicht von flächigen Bereichen auszugehen. Die Größe der Anoden bzw. Makroelemente (vgl. Kapitel 2.1.1.1) liegt im Zentimeterbereich, da sie für ihre Umgebung einen Schutz vergleichbar einer Opferanode darstellen.

Findet die Abtastung einer Fläche nur in einer Orientierung statt, so wird auch nur eine Komponente des Gradientenvektors (vgl. Kapitel 3.2.4) erfasst werden. Finden sich hier trotzdem Gradienten mit absoluten Werten größer als 100 mV / m bzw. 200 mV / m, so reicht dies als Bewertungskriterium aus, da ein resultierender Gradientenvektor aus beiden Komponenten betragsmäßig immer nur größer oder gleich den Einzelkomponenten sein kann.

Bei määnderförmigen Fahrspuren muss bei der Auswertung der Vorzeichenwechsel der Spannungswerte in Abhängigkeit von der Fahrrichtung berücksichtigt werden.

Werden beide Orientierungen durch zueinander orthogonale Messspuren erfasst, so liegen an den Kreuzungspunkten der Fahrspuren beide Komponenten des Gradientenvektors als Spannungswerte vor, die durch vektorielle Addition zusammengefasst werden können. Die Messung in der zweiten Orientierung hat aber äußerst zeitnah zu erfolgen, um einen annähernd ähnlichen Zustand des Betons hinsichtlich Feuchte, Temperatur und Umgebungsbedingungen zu garantieren.

### 3.3 Messungen

#### 3.3.1 Vorversuch mit zweiter ortsfester Referenzelektrode

In [Eckhold2008] wurde die Funktionsweise mit aufgesetzter zweiter Referenzelektrode auf ihre Anwendbarkeit für die Automatisierung im Rahmen des BetoScan-Projekts geprüft. Dazu wurden vergleichende Versuche durchgeführt, bei denen beide Ankopplungsarten für gleiche Messbereiche Anwendung fanden. Als bewegliche Elektrode wurde eine Radelektrode eingesetzt, die zweite Referenzelektrode (Stabelektrode) wurde im zweiten Messdurchgang ortsfest in der Nähe des Ortes der direkten Ankopplung an die Bewehrung aufgesetzt. Abbildung 3-17 zeigt, dass die beiden örtlich aufgelösten Potentialverläufe bis auf den Spannungsoffset, der auf die unterschiedliche Ankopplung zurückzuführen ist, sich sehr stark ähneln.

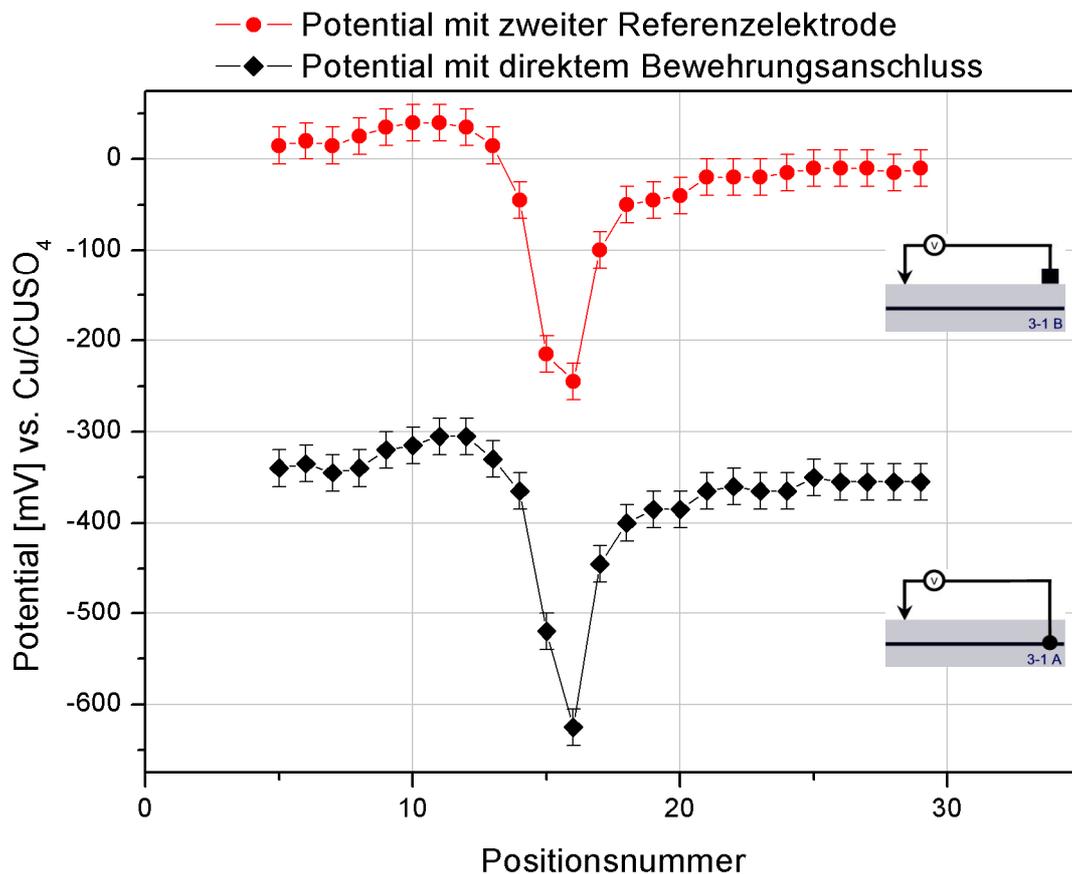


Abbildung 3-17 Vergleich zweier Potentialfeldverläufe entlang der gleichen Messlinie mit direktem Bewehrungsanschluss (schwarz) und in Differenzanordnung mit zweiter Referenzelektrode (rot)

**Fazit:** Damit ist festzustellen, dass die Differenzanordnung, wie auch vorhergehend in [Büchler2007] erwähnt, zwar keine quantitativ gleichen Werte im Sinne einer Bewertung entsprechend der Kriterien des Merkblattes B3 [DGZFP2008] liefert, die vorhandenen Potentialdifferenzen aber qualitativ richtig bestimmt werden können. Durch die Kenntnis der Offsetspannung ist es möglich, die gleichen Messwerte rechnerisch einfach durch deren Addition zu bestimmen. Allerdings vereinfacht dies die Messmethode nicht, da zur Bestimmung der Offsetspannung ein Zugang zur Bewehrung geschaffen werden muss.

Bei weiteren Versuchen, in denen der Abstand zwischen erster und zweiter Elektrode variiert wurde, zeigte sich, dass auch Differenzspannungen in kurzen Distanzen richtig ermittelt werden.

### 3.3.2 Vorversuch zur Differenzmessung

An einem Probekörper mit schlaffer Bewehrung wurden Handmessungen mit zwei Stabelektroden durchgeführt.

Zur Vereinfachung wird zunächst nur der eindimensionale Fall betrachtet. Abbildung 3-18 A zeigt den idealisierten Verlauf einer Potentialfeldverteilung mit deren Ableitung (Gradient). Es ergibt sich der typische signifikante Verlauf (Gradientensignatur) der Ableitungskurve (rot) mit einem Nulldurchgang zwischen lokalem Minimum und Maximum am Ort des Potentialminimums.

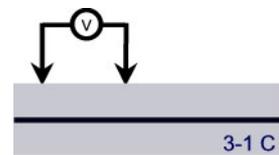


Abbildung 3-18 B zeigt die Messdaten, die auf einem Probekörper (Abbildung 3-18 D) entlang einer Messlinie mit Punktabständen von 50 mm ermittelt wurden. Die schwarz dargestellten Messdaten wurden nach der klassischen Methode mit direktem Bewehrungsanschluss gemäß Abbildung 3-1 A aufgenommen. Es zeigt sich ein lokales Minimum an der Position 55 mm mit ca. -400 mV. Mit der Differenzmethode wurde anschließend mit zwei Elektroden im Abstand von 16 cm die gleiche Messlinie aufgezeichnet (rote Messdaten). Als Bezugsort der ermittelten Spannungen wurde in diesem Fall der Mittelpunkt zwischen beiden Elektroden aufgetragen. Es zeigt sich ein der Berechnung sehr ähnlicher Verlauf mit einem Nulldurchgang bei ebenfalls ca. 55 mm. Der Abstand von 160 mm zwischen den Elektroden war rein willkürlich gewählt worden, zeigte sich aber schnell als wichtiger Parameter des Messverfahrens. Die Betrachtung des geeigneten Elektrodenabstands wird in Kapitel 3.2.6 ausgeführt.

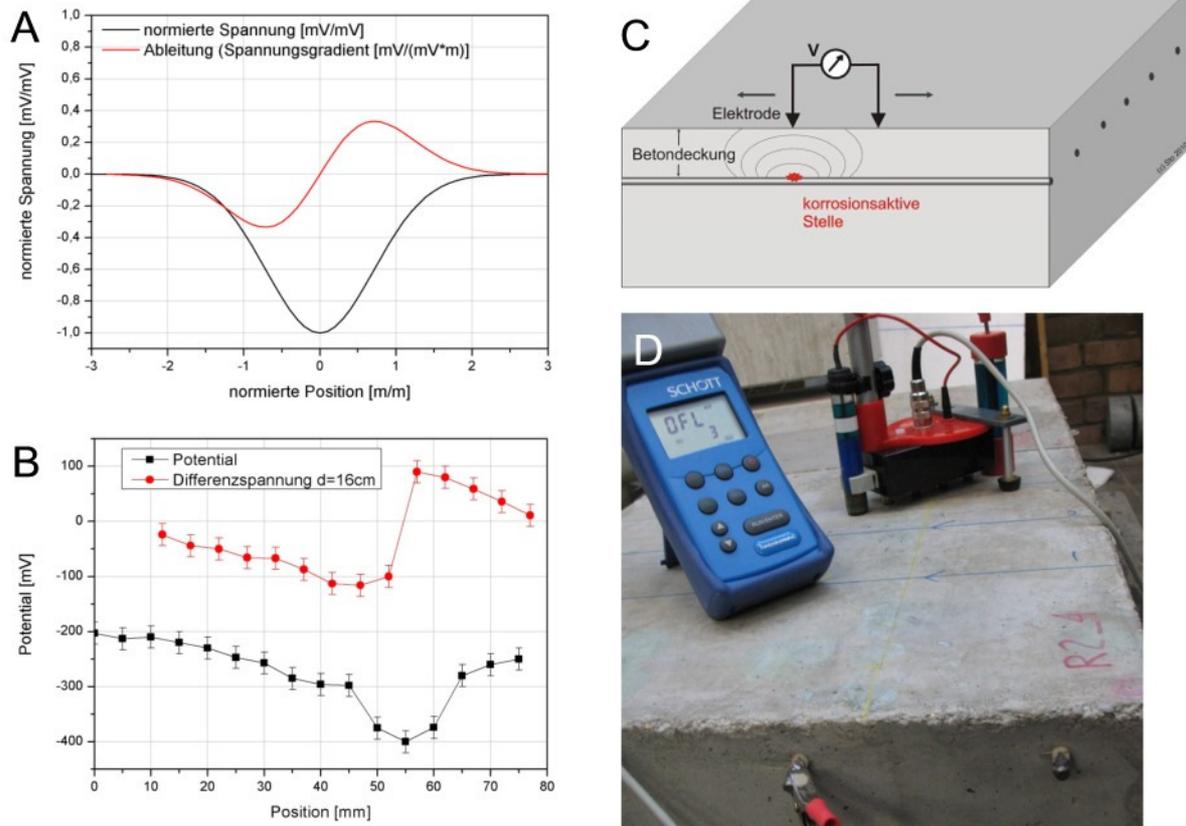
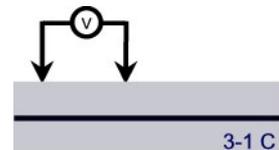


Abbildung 3-18 A: Normierter idealer eindimensionaler Potentialverlauf mit deren Ableitung (Gradient), B: Messergebnisse mit direkter Ankopplung (schwarz) und Differenzanordnung von zwei Elektroden im Abstand von 16 cm (rot), C: Schematische Versuchsanordnung D: Probekörper mit Bewehrungsstäben und Anschlussklemme, Messgerät und Elektroden

### 3.3.3 Versuch an einem Probekörper mit provozierter Korrosion durch Chloridkontamination und Stromeinprägung

Im Rahmen von Versuchen zur Detektion von Korrosion in Stahlbeton mit Radar [Lai2010] wurden Probekörper in der Größe 1,5 m x 0,5 m x 0,5 m mit dem Ziel hergestellt (Abbildung 3-19), den eingebauten Bewehrungsstahl innerhalb weniger Tage korrodieren zu lassen.



Hierzu wurden die Probekörper mehrere Tage komplett in Chloridlösung getaucht gelagert und anschließend wurde der Wasserspiegel wieder abgesenkt. (Abbildung 3-20). Durch Einprägen eines Stroms von bis zu 6 A DC zwischen Anode und Kathode wurde der beschleunigte Korrosionsprozess in Gang gesetzt und so lange betrieben, bis sich Risse an der Oberfläche des Probekörpers zeigten. Während der Stromeinprägung wurden in Intervallen von einer Minute automatisierte Radarmessungen oberhalb der Anode durchgeführt. Weitere Ausführungen zur Auswertung dieser Forschungsarbeit unter [Lai2010].

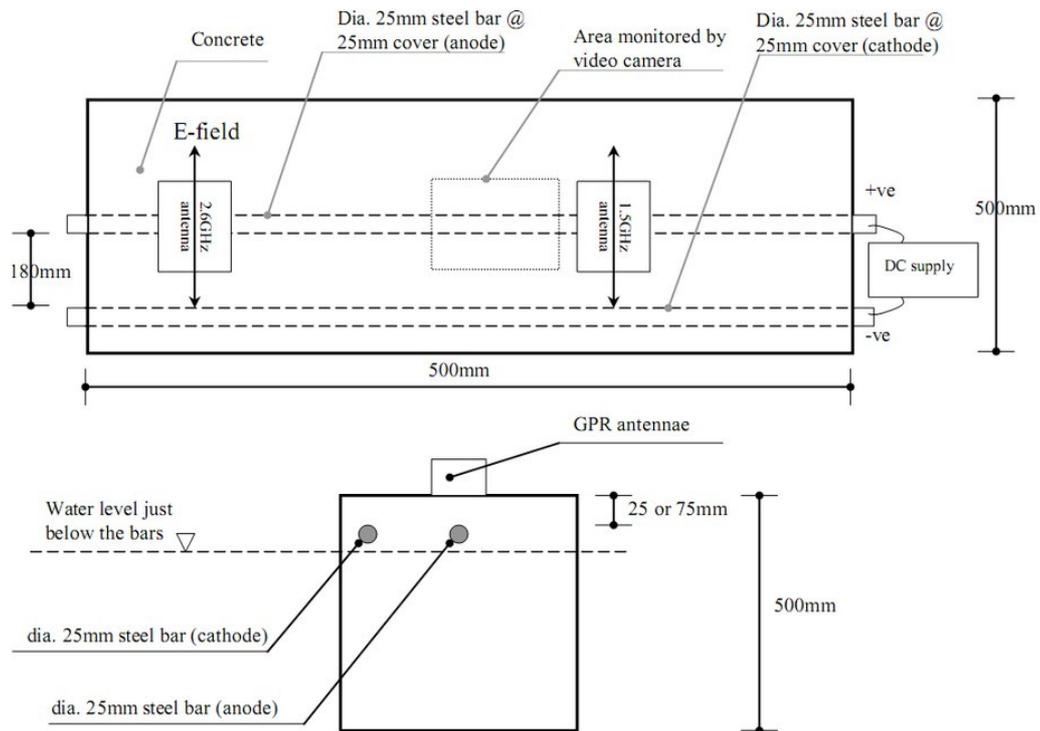


Abbildung 3-19 Aufbau der Probekörper, deren Bewehrung durch Lagerung in Chloridlösung und anschließende Stromeinprägung innerhalb weniger Tage korrodiert

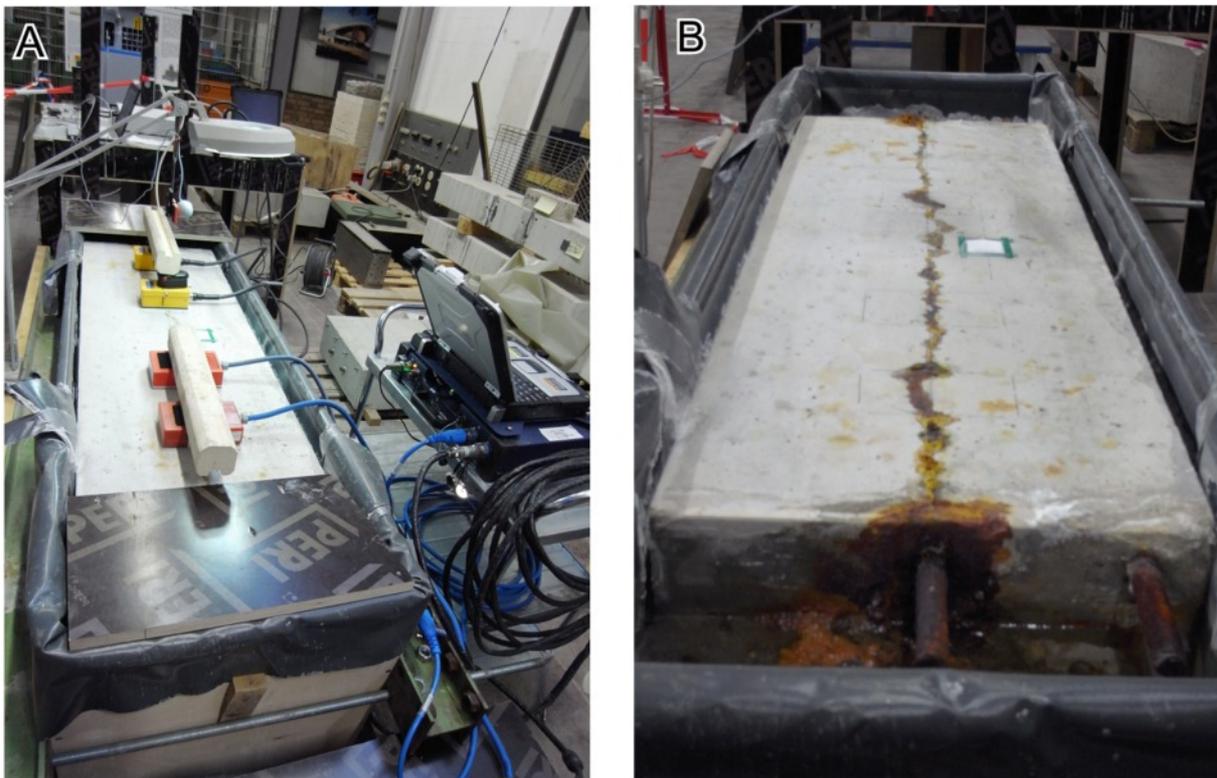


Abbildung 3-20 A: Messaufbau mit Radarantennen während des Korrosionsprozesses, B: Probekörper nach dem Korrosionsprozess, vor dem Säubern der Oberfläche

Einer dieser Probekörper wurde nach dem geschilderten Prozess der Stromeinprägung mit der klassischen Potentialfeldmessung mit Bewehrungsanschluss und der Differenzpotentialfeldmessung in beiden Orientierungen (Abbildung 3-21 und Abbildung 3-22) untersucht. Die Differenzpotentialfeldmessungen (jeweils Grafik B) wurden mit zwei Cu/CuSO<sub>4</sub>-Stabelektroden im Abstand von 10 cm per Hand für beide Orientierungen durchgeführt. Zur Ermittlung des Spannungsoffsets bei den Differenzpotentialfeldmessungen stehen die Werte der Potentialfeldmessungen (Abbildung 3-21 A) zur Verfügung.

Zur Berechnung des Gradienten wurden die Differenzpotentialwerte durch den Elektrodenabstand dividiert, im Prinzip also nur mit einem Faktor skaliert.

Es zeigt sich, dass durch die Integration der Differenzpotentialwerte (Abbildung 3-21 C und Abbildung 3-22 C) annähernd die gleiche Potentialfeldverteilung ermittelt werden kann wie bei der Messung der Potentialfeldverteilung (jeweils Abbildung A).

Die Gradienten der Differenzpotentialwerte (Abbildung 3-21 D und Abbildung 3-22 D) zeigen je nach Orientierung des Elektrodenpaares hohe absolute Werte am lokalen Minimum bzw. Maximum. In beiden Fällen liegen die Absolutwerte über den in [Lay2003] beschriebenen 200 mV / m. Der Mittelpunkt der Gradientensignatur liegt jeweils an der Position des größten negativen Spannungswertes der Potentialfeldmessung.

Die unsymmetrische Gradientensignatur in Abbildung 3-21 D ist sicherlich auf Randeffekte aufgrund der geringen Abmessungen und der für chloridinduzierte Korrosion untypischen Anodengröße (komplette Korrosion des Bewehrungsstabes) innerhalb des Probekörpers zurückzuführen. Die Ausbildung eines so genannten Makroelements (vgl. Kapitel 3.2.1) hat unter realen Bedingungen zur Folge, dass ein Korrosionsangriff nur lokal stark beschleunigt wird. Der die Anode umgebende Stahl wird durch diesen Vorgang geschützt.

In Kapitel 5.1 wird die Detektion eines realen korrosionsaktiven Bereiches auf einer großen Testfläche beschrieben.

Mit diesem Versuch konnte die Funktionsfähigkeit des Verfahrens im Labormaßstab bestätigt werden.

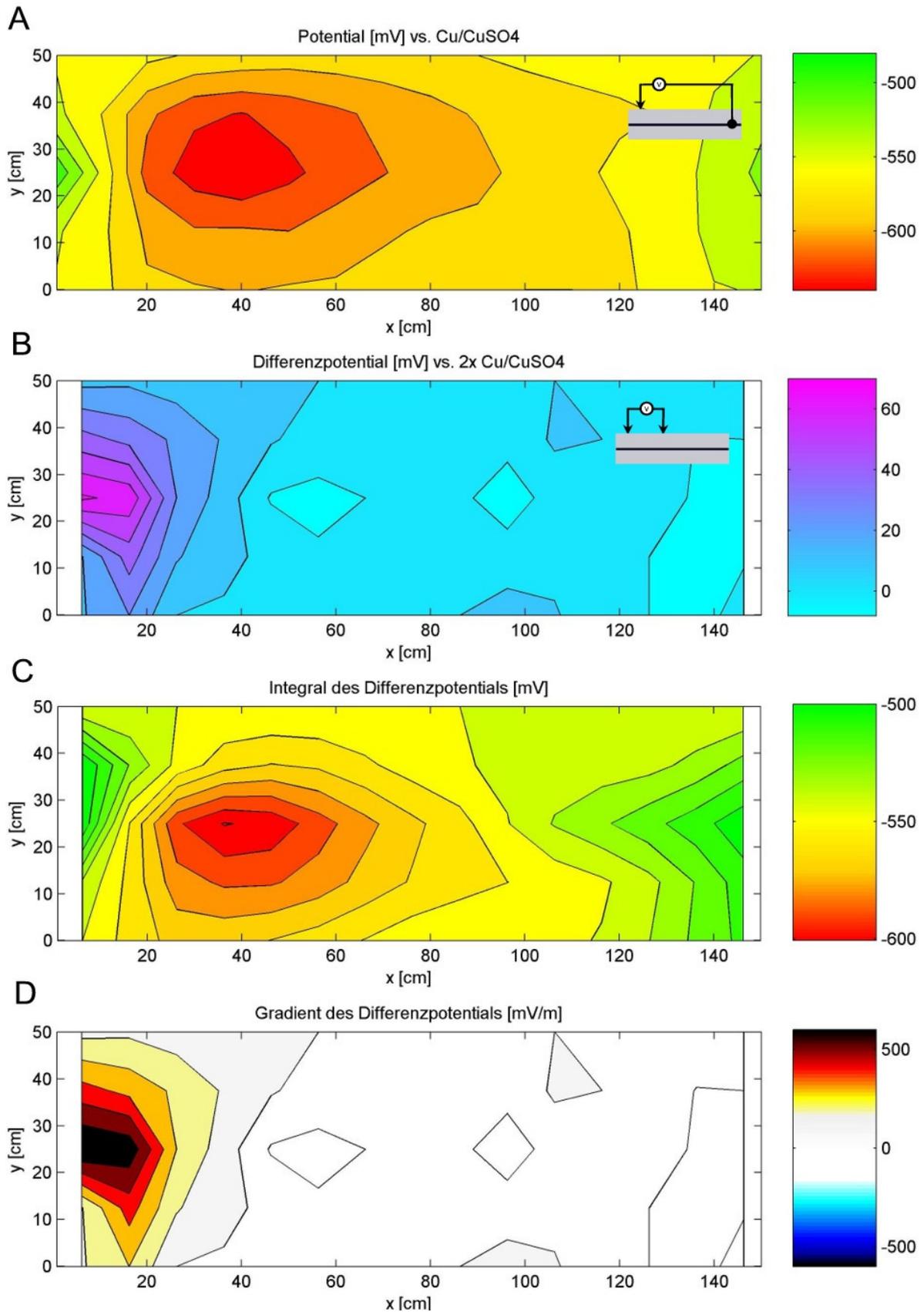


Abbildung 3-21 Darstellung der Potentiale (A), der Differenzpotentiale (B), des Integrals der Differenzpotentiale (C) und des Gradienten der Differenzpotentiale (D) (Orientierung des Elektrodenpaares in x-Richtung, Abstand  $w = 10$  cm)

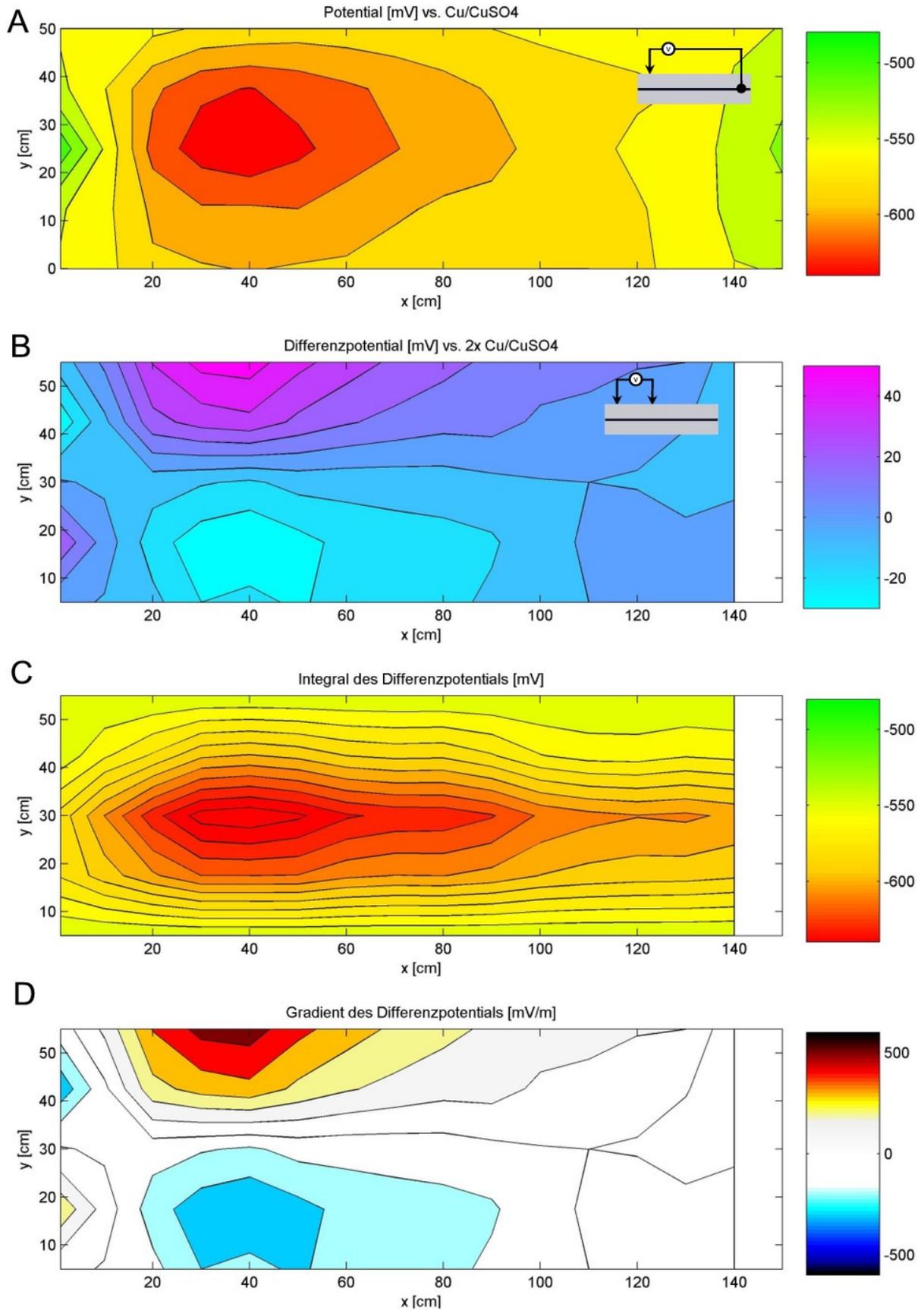


Abbildung 3-22 Darstellung der Potentiale (A), der Differenzpotentiale (B), des Integrals der Differenzpotentiale (C) und des Gradienten der Differenzpotentiale (D)  
**(Orientierung des Elektrodenpaares in y-Richtung, Abstand  $w = 10$  cm)**

### 3.4 Grenzen des Verfahrens

Für die DP-Messung gelten für die Durchführung und Vorbereitung der Messung sowie bei der Handhabung der Messelektroden die gleichen Randbedingungen, wie sie bei einer klassischen Potentialfeldmessung bezüglich der Kriterien des Merkblatts B3 [DGZFP2008] einzuhalten sind.

Hierzu zählt insbesondere, dass auf eine gute Kontaktierung der Elektroden zum Beton zu achten ist. Zu trockene oder abtrocknende Oberflächen bei umfangreichen Messungen können zu Abweichungen der Messwerte führen.

Auch Hydrophobierungen oder teilsanierte Flächen mit Reparaturmörteln können die Messwerte beeinflussen. Auf isolierenden bitumen- oder kunststoffbeschichteten Betonflächen sind weder eine Potentialfeld- noch eine DP-Messung möglich.

Weitere Ausführungen zu Messwertabweichungen sind außerdem im Kapitel 4.6.1 enthalten, das sich der Betrachtung von Messwertabweichungen, die durch Automatisierung entstehen können, widmet.

Gleichsam der Potentialfeldmessung liefert die DP-Messung keine Aussage über Schädigungsgrad oder Dauerhaftigkeit eines Bauteils, da sie nur die aktuelle Korrosionsaktivität widerspiegelt. Für den sachkundigen Planer [Gehlen2010] stellt die DP-Messung allerdings ein verbessertes Hilfsmittel zur Bewertung dar.

Bei der Auswertung mittels Integration, also der Überführung der Differenzpotentialwerte in Potentialwerte, muss anfangs eine Referenzmessung gegen die Bewehrung erfolgen, um den Spannungsoffset zu ermitteln. Der Referenzpunkt zur Bestimmung des Spannungsoffsets muss so gewählt werden, dass er nicht innerhalb eines Potentialtrichters eines korrosionsaktiven Bereiches liegt. Es ist naheliegend, dass dies nicht immer gelingt, da nicht unmittelbar erkennbar ist, ob dieser Fall vorliegt.

Zur Entscheidung ob eine aktive Korrosion vorliegt, müssen in diesem Fall die Bewertungskriterien einer klassischen Potentialfeldmessung zur Anwendung kommen. Wie in Kapitel 3.1.1 ausgeführt, ist die Bewertung nach absoluten fixen Grenzwerten nicht zielführend. Somit erzeugt dieser Ansatz lediglich einen Nachweis dafür, dass die Messwerte der DP-Messung messtechnisch einwandfrei auf die Potentialfeldwerte zurückführen lassen. Die Messung wird vereinfacht, eine Erhöhung der Aussagesicherheit und Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit wird aber nicht erreicht. Die Auswertung anhand der Gradientensignaturen ermöglicht eine sichere Aussage über mögliche Korrosionsbereiche.

Die Betrachtung von Messwertabweichungen wird Kapitel 4.6.1 vorgenommen.

# 4

## Weiterentwicklung der Automatisierung zur Integration der DP-Messung

Der höhere technische Aufwand durch die Automatisierung eines oder mehrerer ZfP-Verfahren rechnet sich bei der Anwendung auf großen Flächen aus mehreren Gründen.

Die elektronische Erfassung der Pose (vgl. Kapitel 2.3.3) ermöglicht eine kontinuierliche Bestimmung des aktuellen Messpunktes nach Position und Orientierung mit einem sehr geringen Messfehler. Laterale Abweichungen zwischen den Messspuren untereinander können durch eine robotergestützte Navigation vermieden oder durch die Bestimmung der tatsächlichen Ist-Position kompensiert werden.

Für die Potentialfeldmessung und für die Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung) ist es wichtig, die Radelektrode(n) gleichmäßig langsam über die Messoberfläche zu bewegen. Gleichzeitig sollen aber alle Messungen möglichst zeitnah und ohne Pause erfolgen. Dies ist erforderlich, um gleichmäßige Umgebungsbedingungen hinsichtlich Bauteil- und Lufttemperatur sowie Luft- und Bauteilfeuchte zu gewährleisten. In beiden Fällen ist die robotergesteuerte Messung der manuellen Messung deutlich überlegen.

Die gleichzeitige Messung mit mehreren ZfP-Verfahren ermöglicht es, sowohl das Untersuchungsobjekt genauer zu beschreiben als auch die Zeit für weitere sonst sequentiell stattfindende Messungen im gleichen Messbereich einzusparen.

Im Folgenden werden die Randbedingungen und Methoden untersucht, die bei einem automatisierten, multisensorischen Messsystem zu beachten sind.

### 4.1 Mäander und Sensorpositionierung

Anders als bei punktförmigen Einzelmessungen oder vorgegebenen Fahrspuren ist man bei flächigen Abtastungen dazu gezwungen, sich möglichst effizient über eine Oberfläche zu bewegen. Ist man darauf beschränkt, nur in einer Fahrtrichtung messen zu können, so wird man ein kammförmiges Fahrmuster (Abbildung 4-1 A) wählen. Die Hinfahrt erfolgt mit einer an das Messverfahren angepassten Geschwindigkeit. Die Rückfahrt bzw. die Rückholung des Sensors an die Startposition der nächsten Messspur kann zwar mit einer erhöhten Geschwindigkeit erfolgen, jedoch nimmt dieser zusätzliche Weg extra Zeit in Anspruch.

Im Normalfall wählt man eine mäanderförmige Fahrweise, bei der der Rückweg auch als Messspur verwendet wird (Abbildung 4-1 B), um eine hohe zeitliche Optimierung der Fahrwege zu erreichen. Für Sensoren mit höheren Empfindlichkeiten in einer Polarisationsrichtung empfiehlt es sich, eine Fläche mit orthogonalen Fahrspuren (Abbildung

4-1 C) abzufahren, um in mindestens zwei Richtungen eine maximale Empfindlichkeit der Sensoren zu erreichen.

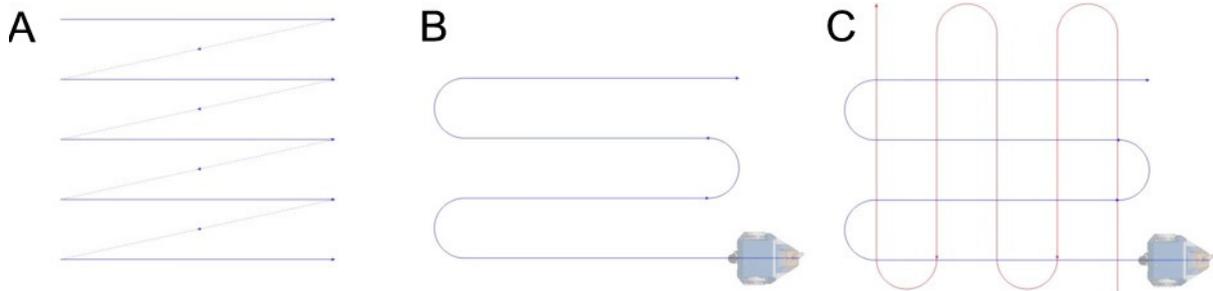


Abbildung 4-1 Prinzip der Fahrspurordnungen A: kammförmig, B: määnderförmig, C: määnderförmig in zwei orthogonalen Orientierungen

Bei der DP-Messung ist zu beachten, dass die wechselnde Orientierung durch määnderförmige Fortbewegung eine Vorzeichenumkehr der Messspannung je Messspur erforderlich macht.

Die gezeigten äquidistanten Fahrspuren gelten nur, wenn sich der auf einem Scanner befindliche Sensor auf der Längsachse befindet. Aus Platzgründen können bei einem Multisensoriksystem meist nicht alle Sensoren direkt auf der Längsachse platziert werden, einige müssen wie bei der DP-Messung quer zur Fahrtrichtung positioniert werden (vgl. Kapitel 3.2.5).

Ziel der folgenden Ausführungen ist es, den optimalen Fahrspurabstand für die gleichzeitige Verwendung mehrerer Sensoren zu ermitteln. Abbildung 4-2 zeigt ein Robotersystem, an dem ein Sensor (blau) auf der Fahrachse und ein weiterer Sensor (grün) im Abstand  $S_{a1}$  zur Achse positioniert sind. Als Abstand der Messspuren werden unterschiedliche Abstände  $b$  vorgegeben. Aus den blauen und grünen Messspuren resultieren dann unterschiedliche wahre Messspurabstände je nach Verhältnis vom Messspurabstand  $b$  zu  $S_{a1}$ .

Abbildung 4-2 A zeigt, dass drei unterschiedliche Distanzen von Messspuren auftreten: die Distanz der blauen Messspur  $b$  und die zwei unterschiedlichen Distanzen der grünen Messspuren. Blaue und grüne Messspuren sind dabei nie deckungsgleich; es werden keinerlei Werte von unterschiedlichen Sensoren am gleichen Ort erhoben.

Im ungünstigsten Fall ( $S_{a1}=b/2$ ) in Abbildung 4-2 B liegen Hin- und Rückweg des grünen Sensors auf der gleichen Messspur; die resultierende Messspurdistanz des grünen Sensors beträgt das Doppelte der Distanz  $b$  der Messspur des blauen Sensors.

Abbildung 4-2 C zeigt, dass im Falle von  $S_{a1}=b$  blaue und grüne Fahrspuren außerhalb der Wendebereiche deckungsgleich aufeinanderliegen, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass sich die Reihenfolge und die Fahrtrichtung der Spuren unterscheidet (siehe Nummerierung 1 bis 4).

In Abbildung 4-2 D ist zu erkennen, dass wiederum zwei resultierende Messspurbreiten für den grünen Sensor auftreten; blaue und grüne Messspuren decken sich nicht. Hier wurde  $S_{a1}>b$  gewählt.

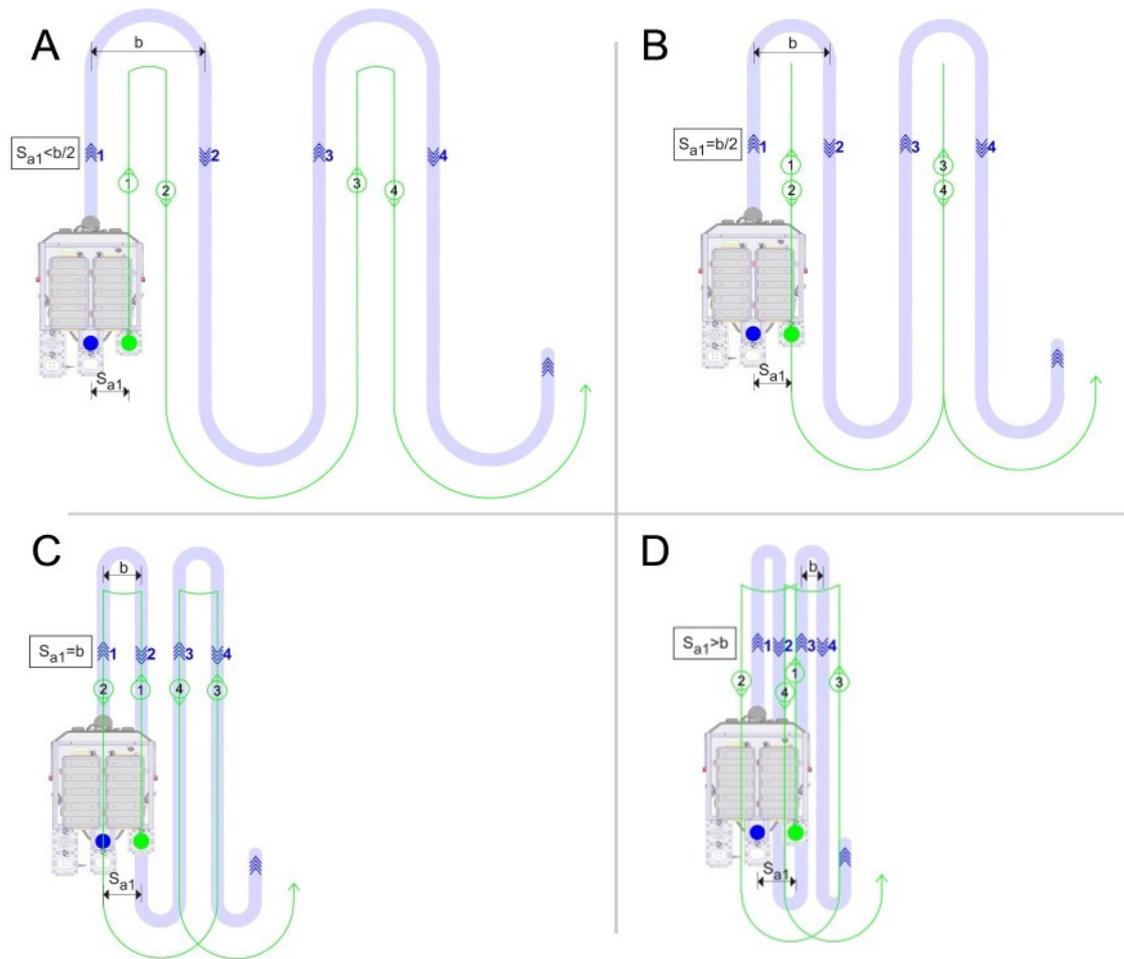


Abbildung 4-2 Schematische Darstellung von verschiedenen Verhältnissen von Fahrspurabstand  $b$  (blaue Linien, blauer Sensor) zu dem Abstand  $S_{a1}$  eines zweiten Sensors (grün), der außerhalb der Fahrachse montiert ist. A:  $S_{a1}$  kleiner als der halbe Fahrspurabstand, B:  $S_{a1}$  gleich halber Fahrspurabstand, C:  $S_{a1}$  gleich dem Fahrspurabstand, D:  $S_{a1}$  größer als der Fahrspurabstand. Die Wendekreise sind zur besseren Übersichtlichkeit idealisiert dargestellt.

Trägt man das Verhältnis von Fahrspurbreite zum Sensorabstand grafisch auf, ergibt sich die Abbildung 4-3. Liegen alle Sensoren auf der Fahrachse, so entspricht der wahre Spurabstand dem vorgegebenen Spurabstand (Marker „auf Achse“). Im Fall A ( $S_{a1} < b/2$ ) existieren zwei wahre Spurabstände für den grünen Sensor, die durch die Richtungsänderung des mäanderförmigen Fahrverlaufs hervorgerufen wird. Bei Verkleinerung des Verhältnisses zwischen Spur- und Sensorabstand bis zum Fall B ( $S_{a1} = b/2$ ) liegen Hin- und Rückweg deckungsgleich übereinander (der zweite wahre Spurabstand ist Null).

Bei einer weiteren Verkleinerung des Verhältnisses im Fall C ( $S_{a1} = b$ ) liegen beide Sensor-Messspuren deckungsgleich übereinander; hier ist die Orientierung der Fahrspuren zu beachten. Bei einem Verhältnis von Spur- zu Sensorabstand kleiner eins (Fall D,  $S_{a1} > b$ ) erhält man wieder zwei wahre Spurabstände.

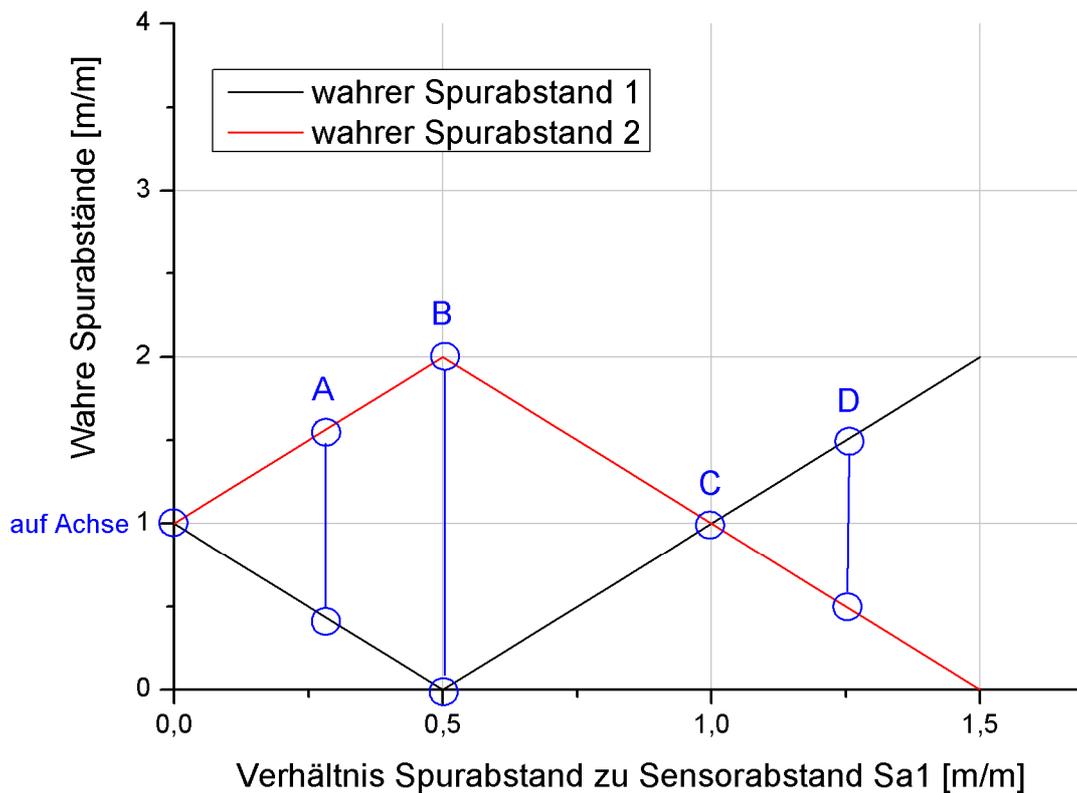


Abbildung 4-3 Ermittlung der wahren Spurbstände für die Verhältnisse von Spurbestand zum Sensorabstand eines außerhalb der Längsachse montierten Sensors für die Fälle ABCD in Abbildung 4-2

Die Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 verdeutlichen, dass die Wahl eines geeigneten Verhältnisses zwischen Fahrspur- und Sensorabstand zur Fahrachse entscheidend für eine gleichmäßige Abtastung der zu untersuchenden Fläche notwendig ist. Erschwerend kommt hinzu, dass in einem Multisensoriksystem immer mehrere Sensoren außerhalb der Fahrachse platziert werden müssen. In diesem Fall entstehen Mischformen der Fälle ABCD. Hier gilt es festzustellen, welche Notwendigkeiten für die Positionierung der Sensoren bestehen, welche Messpunktdichte (siehe Tabelle 3 im folgenden Abschnitt 4.2) vom Verfahren gefordert ist und ob deckungsgleiche Messspuren für mehrere Sensoren erforderlich sind. Im letzten Fall muss der Messspurbestand dem Sensorabstand entsprechen (Fall C), sofern nicht alle Sensoren auf der Fahrachse platziert werden können.

## 4.2 Messpunktabstände

Anders als für scannende Systeme, bei denen Messwerte meist in äquidistanten Abständen in beiden Koordinatenrichtungen aufgenommen werden, ist dies für eine großflächige Abtastung zwar möglich, aber in den meisten Fällen nicht sinnvoll. Als Messpunktabstand wird hier der Abstand der einzelnen Messpunkte in Fahrtrichtung einer automatisierten Roboterplattform bezeichnet. Der Abstand der Messwerte quer zur Fahrtrichtung wird über den (wahren) Spurbestand (vgl. vorangegangenes Kapitel) definiert.

Bei kontinuierlich messenden Sensoren sind in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und des kleinstmöglichen Datenintervalls (siehe Tabelle 8) Messpunktabstände beginnend im Millimeterbereich bis hin zu etlichen Dezimetern realisierbar.

Je nach Verfahren müssen die Randbedingungen, die zu einer hohen Aussagesicherheit bzw. Detektionswahrscheinlichkeit führen, bezüglich der Messpunktabstände beachtet und ggf. optimiert werden: Zu große Messpunktabstände vermindern die Aussagesicherheit, zu kleine Messpunktabstände erhöhen diese unter Umständen nicht, sondern erzeugen nur mehr redundante Daten, die die zu speichernden Datenmengen und die Rechenzeit der Auswertung erheblich vergrößern. Gegenüber Handmessungen sollte aber gerade der Umstand ausgenutzt werden, dass automatisiert mit einer hohen Messpunktdichte mühelos eine hohe Aussagesicherheit erreicht werden kann. Eine spätere Verdichtung der Daten beispielsweise durch Mittelwertbildung bleibt unbenommen.

Folgende Tabelle 3 mit Messpunktabständen, die eine ausreichende Detektionssicherheit des jeweiligen Verfahrens erlauben, wurde aus den Angaben einschlägiger Literatur erstellt sowie aus Gerätehandbüchern abgeleitet:

Der Inhalt der Tabelle 3 zeigt die bei kontinuierlich und berührungslos arbeitenden Verfahren praxisnahen Messpunktabstände  $\Delta x$  in Messspurrichtung. Der laterale Versatz  $\Delta y$  der Messspuren wird anhand der Ansprüche an die Aussagesicherheit im Verhältnis zum Aufwand an die Geschwindigkeit der Handmessungen ausgelegt.

Für diskontinuierliche Punktmessungen (beim Ultraschall-Verfahren) werden äquidistante Raster in beiden Koordinatenrichtungen als Optimum des Verhältnisses von geforderter Aussagesicherheit und Aufwand festgelegt.

Tabelle 3 Zerstörungsfreie Messverfahren und Beispiele für Empfehlungen oder Forderungen an Messpunktabstände bei Handmessungen

Messgröße / Verfahren	Messpunkt abstand $\Delta x$	Messpunkt abstand $\Delta y$	Bemerkung
Luftfeuchte und – temperatur	-	-	Messung – wenn überhaupt – nur stichprobenartig vor oder während einer Prüfung.
Betondeckung (Wirbelstrom)	1 cm	15 cm	Gemäß Handbuch Profometer 5+ [Proceq] Einstellung der Abstände für Rastermessungen. Das Raster sollte immer größer sein als die Teilung der ersten Bewehrungslage
Potentialfeldmessung (zur Bestimmung der Korrosionswahrscheinlichkeit)	25 cm	25 cm	Gemäß [DGZFP2008] für „hohe Ansprüche“ zur Detektion kleinster Anzeigen bis zu 10x10 cm
Feuchteverteilung (Mikrowelle)	5 cm	20-50 cm	Gemäß [Göller2007]
Elektrolytischer Betonwiderstand	-	-	Stichprobenartig bei der Potentialfeldmessung gemäß [DGZFP2008]
Dickenmessung (Ultraschall)	80 cm	80 cm	Gemäß Anordnung in der Richtlinie zur Prüfung von Tunnelinnenschalen [RI-ZFP-TU], Verdichtung des Messrasters bei Verdachtsstellen
Betondeckung / Dickenmessung (Radar)	0,5 cm	20 cm	Gemäß Handbuch Mala CX [Mala] Einstellungen für “Gridprojekte” zur bildgebenden Darstellung der Bewehrungsverteilung

Aus den Angaben der Tabelle 3 lässt sich für die automatisierte Anwendung der Verfahren schlussfolgern, dass sich mit kleineren Messpunktabständen die Aussagesicherheit eines Verfahrens verbessern wird. Dies ist sicherlich auch bei Handmessungen der Fall, aber aufgrund des damit verbundenen Aufwands nicht wirtschaftlich.

Da bei automatisierten Systemen der Messpunktabstand nur von technischen Randbedingungen wie beispielsweise den Datenintervallen (vgl. Tabelle 8) abhängt und keinen manuellen Mehraufwand bedeutet, sollten alle verfügbaren Werte aufgezeichnet werden. Bei einer den Datenintervallen angepassten Fahrgeschwindigkeit, die eine Unterabtastung vermeidet, können die Sensordaten automatisiert mit einer deutlich höheren Messpunktdichte aufgenommen werden.

Als Grundlage für weitere Betrachtungen wird in Messspurrichtung als Normierung der Messpunktabstand von einem Zentimeter gewählt. Die Wahl eines geeigneten Abstandes zwischen den Messspuren orientiert sich an den Tabellenwerten und den nachfolgenden Überlegungen zur Flächenleistung.

### 4.3 Flächenleistung

Bei der Ermittlung der Flächenleistung eines automatisierten Systems sind neben der Gesamtfläche und der Fahrgeschwindigkeit auch die Wendezeit für einen Richtungswechsel im mäanderförmigen Fahrbetrieb und der je nach Verfahren benötigte Spurb Abstand nicht zu vernachlässigen. Auch die Betriebsart eines Sensors, ob kontinuierlich oder diskontinuierlich gemessen wird, muss in die Berechnung eingehen:

Die Anzahl der Fahrspuren  $n$  berechnet sich für eine gegebene Fläche  $A$ , die Länge einer Fahrspur  $l$  und dem Abstand  $b$  zwischen den Fahrspuren berechnet sich zu:

$$n = \frac{A}{l * b} + 1 \quad (11)$$

Die Gesamtmesszeit  $T_{ges}$  berechnet sich somit aus einer beliebigen Gesamtfläche  $A_{ges}$  und den Fahrzeiten  $t_w$  zum Wenden und den Fahrzeiten  $t_s$  für eine Spur zu:

$$T_{ges} = n * (t_s + t_w) - t_w = \left(\frac{A_{ges}}{l * b} + 1\right) * (t_s + t_w) - t_w \quad (12)$$

Die Fahrzeit  $t_s$  je Spur setzt sich dabei aus der reinen Fahrzeit und der zusätzlichen Messzeit für die Anzahl  $k$  an diskontinuierlichen Punktmessungen der Dauer  $t_p$  zusammen, in der auch das Abbremsen, Beschleunigen und das Absetzen des Sensorkopfes berücksichtigt werden muss.

$$t_s = \frac{l}{v} + k * t_p \quad (13)$$

Die Flächenleistung normiert in  $m^2$  pro Stunde mit ausschließlich kontinuierlichen Messverfahren ( $t_p=0$ ) ergibt sich somit – näherungsweise unter Vernachlässigung der letzten Spur und des letzten nicht vorhandenen Wendevorganges – zu:

$$\frac{A_{1h}}{1h} \Leftrightarrow \frac{A_{ges}}{T_{ges}} \approx \frac{b}{\frac{1}{v} + \frac{t_w}{l}} \quad (14)$$

Die Wendezeit  $t_w$  ist unabhängig von der maximalen Fahrgeschwindigkeit nahezu konstant, da ein automatisiertes System diese bei einem Wendemanöver meist gar nicht erreicht. Die Fahrgeschwindigkeit in einer Messspur, die beispielsweise bei der verwendeten Roboterplattform bis zu 1 m/s betragen könnte, kann aber nicht frei gewählt werden, da sie durch das kleinste mögliche Datenintervall der verwendeten Sensoren limitiert ist (Tabelle 8). Die kleinstmögliche Strecke  $\Delta s$ , die bei gegebenem Datenintervall  $\Delta t$  und Fahrgeschwindigkeit  $v$  aufgelöst werden kann, berechnet sich zu:

$$\Delta s = v * \Delta t \quad (15)$$

Wird die Fahrgeschwindigkeit bei gleicher Datenrate erhöht, so kommt es zu einer Unterabtastung, da die Sensoren keine Werte für die benötigten Messpunkte liefern können.

Variiert man je nach benötigter Messpunktdichte orthogonal zur Fahrtrichtung den Abstand  $b$  zwischen den Fahrspuren, ergibt sich folgende Darstellung (Abbildung 4-4). Über die obere Abszisse kann man das Mindestdatenintervall des langsamsten Sensors als Eingabewert benutzen, um eine Fahrgeschwindigkeit auswählen zu können, die einen Messwert je gefahrenem Zentimeter in Fahrtrichtung ohne Unterabtastung garantiert.

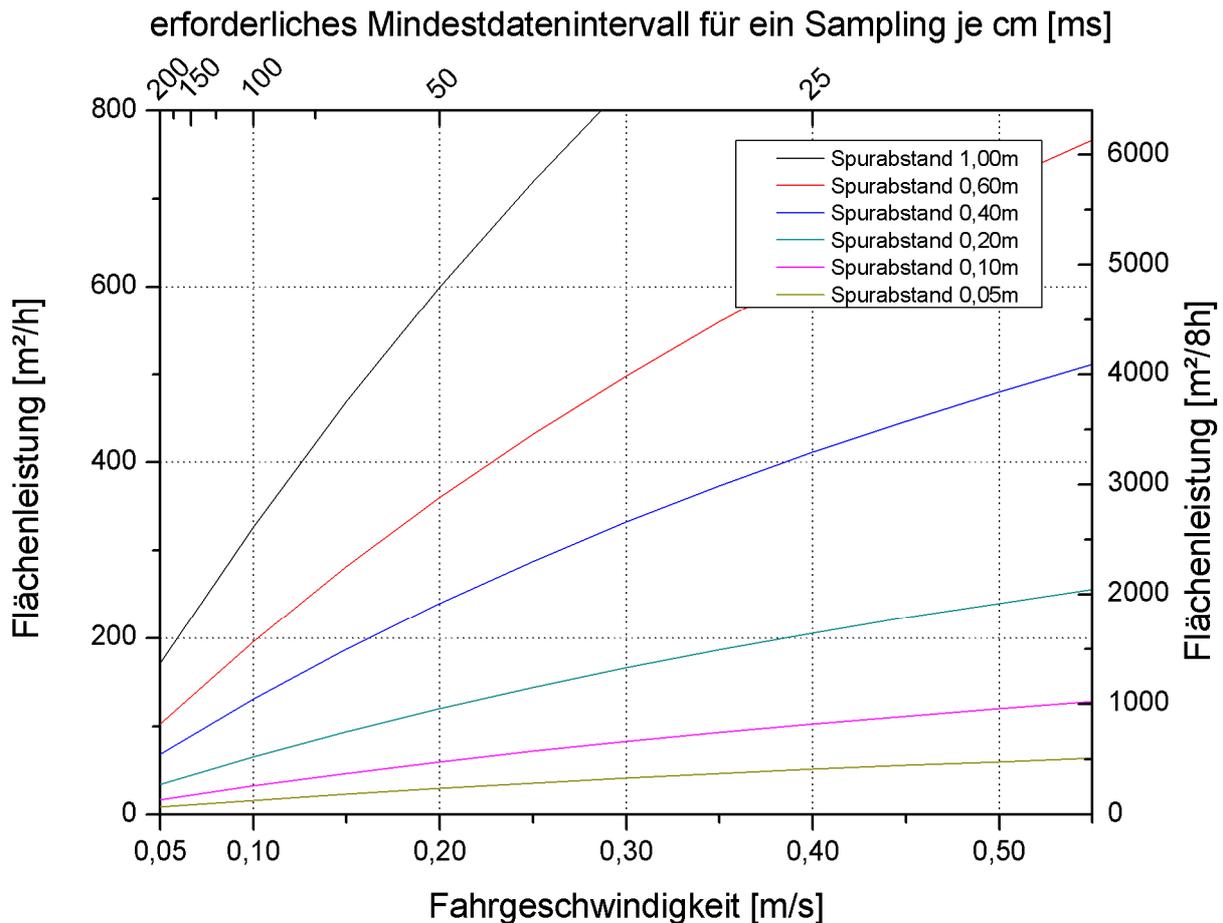


Abbildung 4-4 Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und Flächenleistung je Stunde (rechte Ordinate Flächenleistung je angenommener Messzeit eines Arbeitstages von 8h) bei Variation des Spurabstandes  $b$  und typischer konstanter Spurlänge von 20 m.

Um beispielsweise mehr als 100 m<sup>2</sup> Fläche pro Stunde mit einem Zentimeter-Messraster in Fahrspurrichtung messen zu können, muss eine Fahrgeschwindigkeit gewählt werden, die an die Mindestdatenrate angepasst ist. Für größere Messpunktabstände in Fahrtrichtung können entsprechend auch proportional höhere Fahrgeschwindigkeiten gewählt werden.

Je kleiner die benötigte Zeit zum Wenden und je größer die Länge der zu fahrenden Messspuren ist, desto mehr zeigt sich der ursprünglich erwartete lineare Zusammenhang. Es ergibt sich gemäß Gleichung (14)

$$\frac{A_{1h}}{1h} \approx b \cdot v \text{ für } \frac{t_w}{l} \rightarrow 0. \quad (16)$$

Abbildung 4-5 zeigt die Flächenleistung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und der Spurlänge bei konstanter Wendezeit  $t_w$ .

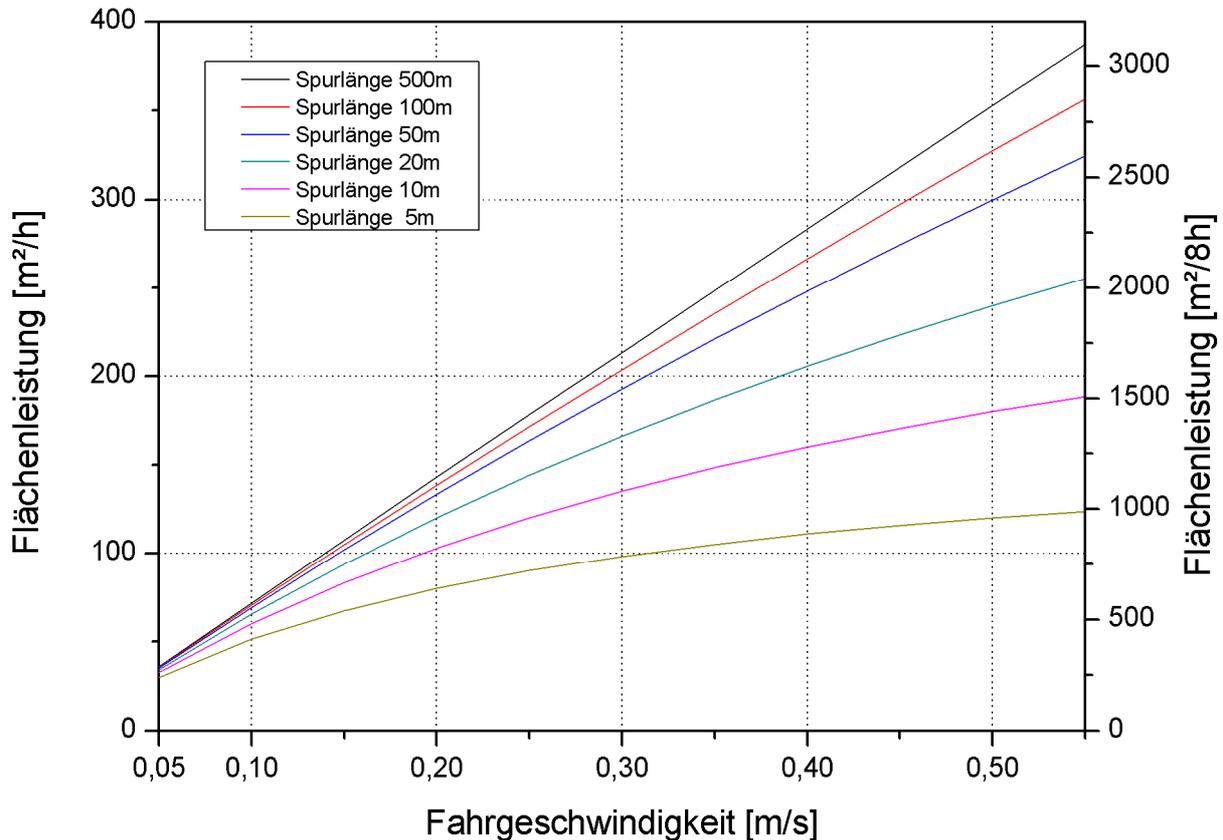


Abbildung 4-5 Zusammenhang zwischen der Flächenleistung pro Stunde (oder pro 8h) und der Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Spurlänge bei einer konstanten Wendezeit von 20 s und einem konstanten Spurbabstand von 0,2 m.

Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, dass ab einer Spurlänge von 50 m die Wendezeit nicht mehr so stark ins Gewicht fällt. Je höher die Fahrgeschwindigkeit umso größer ist die Erhöhung der möglichen Flächenleistung.

Durch diskontinuierliche Verfahren, bei denen für eine einzelne Punktmessung angehalten und der Sensor an die Oberfläche angepresst werden muss, wird die Flächenleistung weiter herabgesetzt. Die Abhängigkeit der Flächenleistung von der Punktmesszeit  $t_p$  in einem angenommenen Messraster von 0,5 m zeigt das Diagramm in Abbildung 4-6. Zum Vergleich dient die Flächenleistung einer kontinuierlichen Messfahrt (Punktmesszeit 0 s) mit typischer Spurlänge von 20 m und einem Spurbabstand von 0,2 m, wie sie bereits den Kurvenscharen im Diagramm in Abbildung 4-5 zugrunde gelegt worden sind.

Zu erkennen ist, dass der diskontinuierliche Stopp der dominierende Faktor für die Flächenleistung ist. Das bedeutet, dass bei Kombinationen von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren für kleine Fahrgeschwindigkeiten der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit sehr gering ist und bei hohen Geschwindigkeiten durch Geschwindigkeitserhöhung kaum Kompensation der Verzögerungen durch den Stopp erreicht wird.

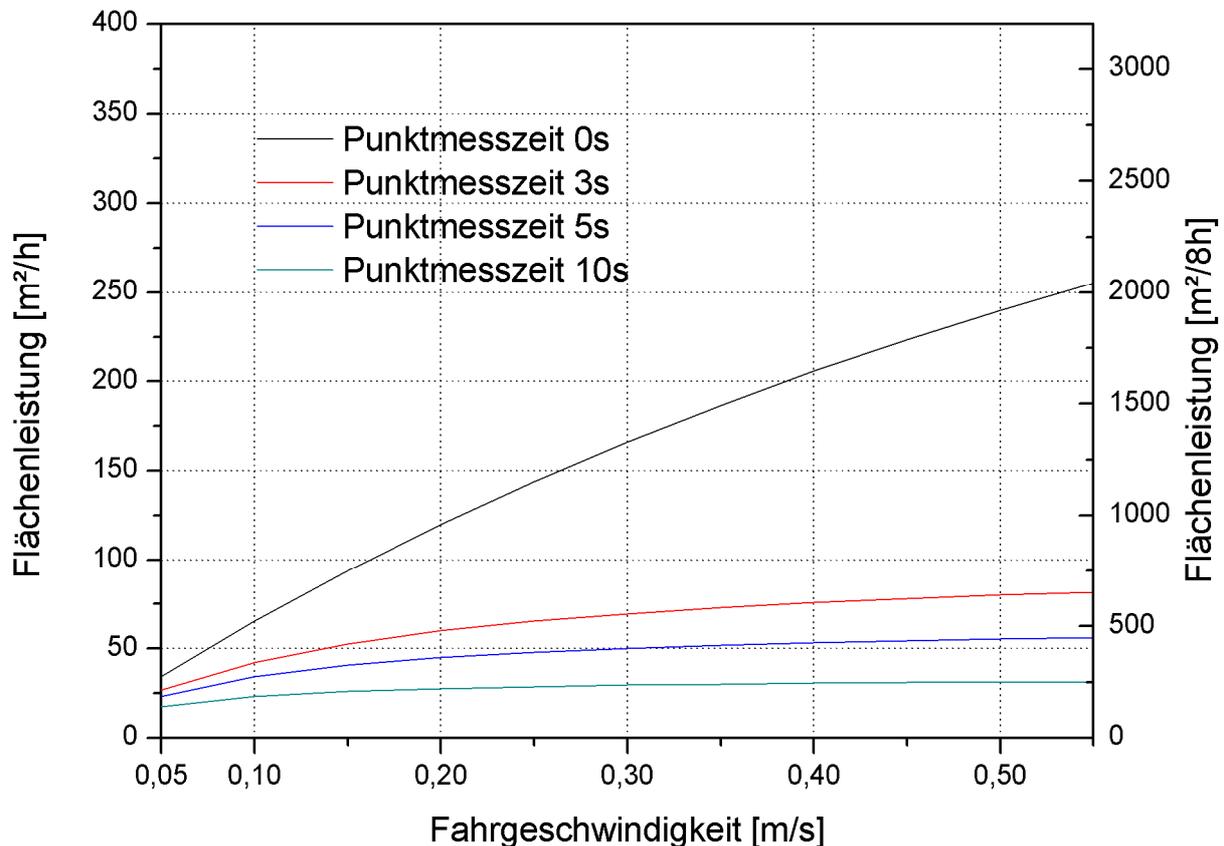


Abbildung 4-6 Zusammenhang der Flächenleistung pro Stunde (oder pro 8h) bei Variation der Punktmesszeit an Messpunkten, die in Intervallen mit Abstand von 0,5 m entlang der Fahrachse aufgenommen werden.

Empirisch wurde in Versuchen festgestellt [Stoppel2007], dass Punktmesszeiten unter 3 s aufgrund der mechanischen Komponenten und der einzuhaltenden Wartezeiten kaum oder nicht realisierbar sind. Wartezeiten ergeben sich beispielsweise bei Messungen mit dem Ultraschallecho-Verfahren durch eine notwendige Wartezeit für das Ausschwingen der Piezokeramiken nach einem Impuls, der durch das mechanische Absetzen des Ultraschallmesskopfes entsteht.

## 4.4 Verfahrenskombination

In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, wie durch die Kombination von Verfahren die Aussagesicherheit von Messergebnissen einzelner Messgrößen erhöht werden kann.

### 4.4.1 Messung der Betondeckung und Lokalisierung der Bewehrung mit Wirbelstrom und Radar

Beide Verfahren haben, bedingt durch den Aufbau ihres Sensorkopfes (Spulen oder Antennen), eine lineare Polarisationsrichtung. Ein Auffinden von Bewehrungsstäben ist beim Überstreichen der Messfläche am besten senkrecht zu dieser Polarisationsrichtung aufgrund der größeren Empfindlichkeit in dieser Richtung möglich. Zur Detektion der meist gitterförmig in allen Richtungen verlegten schlaffen Bewehrung empfehlen sich immer zusätzliche Messspuren mit zur ersten Messung orthogonaler Polarisation. Bei manuellen Messungen wird dies durch eine Drehung des Sensorkopfes und softwaremäßige Überlagerung aller Messspuren erreicht. Bei automatisierten Messungen werden ebenso die Messungen aller Messspuren in die Auswertung einbezogen, eine Drehung des Sensorkopfes ist nicht erforderlich. Diese Methodik ist die Grundvoraussetzung für folgende Betrachtung:

Das Wirbelstromverfahren ist prinzipbedingt auf eine Aussage zur Betondeckung und Lokalisierung der oberflächennahen Bewehrung (erste Lage und zweite darunter kreuzweise verlegte Lage der Stäbe oder als Maschengitter) beschränkt. Tiefer liegende Bewehrung wird nur angezeigt, wenn die Einbautiefe nicht zu groß und ein ausreichender Abstand zur oberflächennahen Bewehrung besteht. In der Regel ist dies nicht der Fall.

Die Messung der Betondeckung mit dem Wirbelstromverfahren setzt die Kenntnis des verwendeten Stabdurchmessers voraus. Im umgekehrten Fall kann bei bekannter Betondeckung auf den Stabdurchmesser geschlossen werden. Beide Messwerte können nicht gleichzeitig ermittelt werden. Das Wirbelstromverfahren ist unabhängig vom Feuchtegehalt des Betons. Nicht metallische Objekte können nicht detektiert werden.

Im oberflächennahen Bereich, entsprechend dem Nahfeld einer Radarantenne, kann aufgrund der Überlagerung von Anzeigen mit Reflektionen der Oberfläche unter Umständen keine hinreichend genaue Tiefenlokalisierung der schlaffen Bewehrung zur Bestimmung der Betondeckung erfolgen. Bei der Auswertung der Reflexionshyperbeln werden dann üblicherweise Reflexionshorizonte bestimmt, die aber mit einer großen Messunsicherheit behaftet sind.

Mit dem Radarverfahren können auch tiefer liegende Bewehrungslagen lokalisiert werden. In diesem Fall erfolgt eine Auswertung der Messdaten durch Migration der dreidimensionalen Datensätze. Durch schichtenweise Auswertung der Projektionen kann der lagenweise Aufbau der Bewehrung nachvollzogen werden. Auch nicht parallel zur Oberfläche verlaufende Bewehrung kann durch geeignete Schnitte visualisiert werden.

Zudem können mit dem Radarverfahren auch nichtmetallische Objekte geortet werden, falls sich deren dielektrische Eigenschaften von dem des Betons unterscheiden. Beispiele hierfür

sind Kunststoffrohre, wobei zu beachten ist, dass deren Reflexionsamplituden deutlich geringer ausfallen.

Kombiniert man beide Verfahren durch parallele Messung, so erhält man zwei Messdatensätze mit Ortsreferenzierung zur gleichen Messfläche, deren beider Informationsgehalt zur Interpretation herangezogen werden kann.

Der Vergleich beider Verfahren zeigt, dass die Auswertung einer Wirbelstrommessung zur Bestimmung der Betondeckung deutlich einfacher ist, da beim Radarverfahren die Auswertung durch Rekonstruktionsrechnungen wesentlich aufwendiger ist.

Auch ist bei einer ungleichmäßigen Feuchteverteilung oder bei einem erhöhtem Wassergehalt des Betons das Wirbelstromverfahren vorteilhafter, da der Wassergehalt keinen Einfluss auf das Wirbelstromverfahren hat.

Das Radarverfahren bietet hingegen den Vorteil, dass auch tiefer liegende Bewehrung sowie die Bauteildicke (je nach Bewehrungsgrad und Antennentyp) ermittelt werden kann.

#### **4.4.2 Messung der Potentialfeldverteilung unter Berücksichtigung der Bauteilfeuchte oder des elektrolytischen Betonwiderstands**

Die Messwerterfassung des BetoScan-Systems wurde modular aufgebaut, so dass für jede Messung die Kombination aus Sensoren frei wählbar ist.

Bei der Messung des Potentialfeldes zur Ermittlung einer Korrosionswahrscheinlichkeit erscheint es auf den ersten Blick nicht sinnvoll, die Bauteilfeuchte gleichzeitig mit der Potentialfeldmessung (oder Differenzpotentialfeldmessung) zu erfassen, da aufgrund der notwendigen Vorwässerungen [DGZFP2008] der zu untersuchenden Flächen nicht die reale Bauteilfeuchte ermittelt werden würde. Alternativ kann aber in diesem Fall die Bauteilfeuchte zur Prüfung des zur Messung notwendigen Feuchtegehalts herangezogen werden, da eine Abtrocknung der Oberflächen zu signifikanten Potentialverschiebungen führen kann. Somit kann die Aussagesicherheit des Verfahrens durch diese Verfahrenskombination erhöht werden, wenn festgestellt wird, dass sich die Bauteilfeuchte während des gesamten Messzeitraums nicht signifikant geändert hat.

Der gleiche Ansatz wird in [Schneck2005] erfolgreich bei manuellen Messungen durch Kombination mit der gleichzeitigen Messung der Betondeckung und des spezifischen elektrolytischen Widerstands als indirekter Indikator zur Abschätzung des Feuchtegehalts verwendet. Abschätzung daher, weil der elektrolytische Widerstand im Gegensatz zur Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren nicht unabhängig vom Salzgehalt ist. Aufgrund der punkweisen Einzelrastermessung sind die manuellen großflächigen Messungen mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden.

Die Messung des elektrolytischen Betonwiderstands erfordert aufgrund der Wenner-Anordnung mit Stromeinspeisung keine speziellen Elektroden mit kleinen Eigendifferenzspannungen. Kommerziell sind Vierpunkt-Elektrodenhalterungen für Handmessungen verfügbar. Abbildung 4-7 B zeigt einen Kombinationsmesskopf mit Vierpunktelektroden, Kupfer/Kupfersulfatelektrode und Temperatursensor. Um die Anisotropie der Leitfähigkeiten innerhalb eines Bauwerks räumlich aufzuzeichnen, bieten sich zwei Vorgehensweisen an. Zum einen kann analog zur punktwisen diskontinuierlichen Ultraschallmessung ein Messkopf pneumatisch in einem groben Raster an das zu untersuchende Messobjekt angedrückt werden. Im Rahmen des BetoScan-Projekts wurde eine Vierradelektrode entwickelt, die dazu dienen soll, den elektrolytischen Betonwiderstand kontinuierlich aufzuzeichnen (Abbildung 4-7 A).

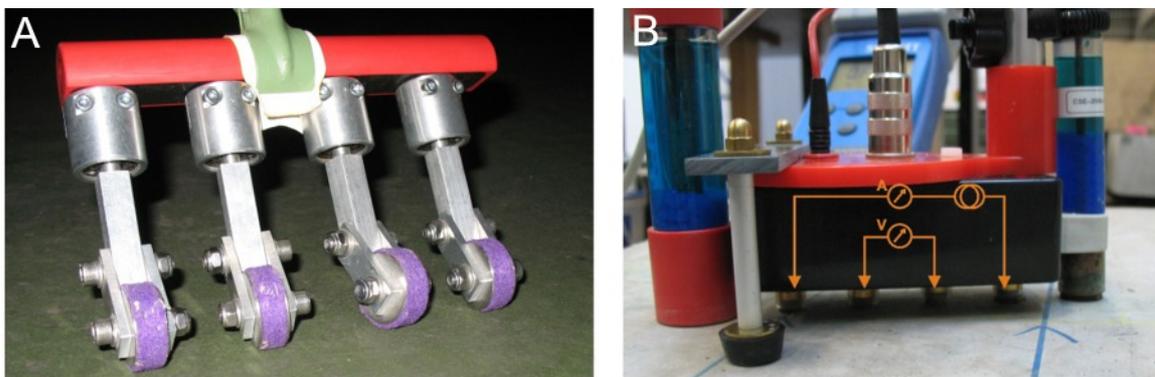


Abbildung 4-7 A: Neu im Rahmen des BetoScan-Projekts entwickelte Vierradelektrode zur großflächigen Messung des elektrolytischen Betonwiderstands, B: Kombinationsmesskopf mit Vierpunktelektroden, Kupfer/Kupfersulfatelektrode und integriertem, oberflächennah positioniertem Temperatursensor (Citec-Survey) [Citec]

Zum anderen werden derzeit am Institut für Bauforschung in Aachen (IBAC) im Rahmen des BetoScan-Projekts weitere Arbeiten durchgeführt, um die schwierigen Randbedingungen hinsichtlich der Ankopplung, des Elektrodenabstands, der Befeuchtung der Elektroden und der möglicher Verschmutzung des Filzbelages zu untersuchen.

Die Verfahrenskombination mit der Messung des elektrolytischen Betonwiderstands wäre im Vergleich zur Mikrowellenfeuchtemessung attraktiver, da die entsprechenden Messgeräte deutlich preiswerter sind.

## 4.5 Vergleich mit Handmessungen

Um den Mehrwert von automatisierten Messungen gegenüber Handmessungen auch für den Zeit- bzw. Personalbedarf abzuschätzen, wurde in einer Bachelorarbeit [Stärke2009] die Messdauer bei Handmessungen im Vergleich zu automatisierten Messungen gegenübergestellt (Tabelle 4).

Tabelle 4 Messdauervergleich zwischen Handmessungen und automatisierten Messungen mit kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitenden Sensoren bei einem Messspurabstand von 0,5 m

Kontinuierliche Messung	Handmessung mit einem Sensor	automatische Messung	Simulation
Dauer/11 m <sup>2</sup> (in min)	ca. 5 – 10	4	3,5
<b>Hochrechnung :</b>			
Dauer/ 100 m <sup>2</sup> (in min)	ca. 50 – 100	40	ca. 40
Dauer/1000 m <sup>2</sup> (in h)	8 -16	7	7

Diskontinuierliche Messung	Handmessung mit einem Sensor	automatische Messung	Simulation
Dauer/11 m <sup>2</sup> (in min)	ca. > 20	10	10,5
<b>Hochrechnung :</b>			
Dauer/ 100 m <sup>2</sup> (in min)	ca. >200	100	105
Dauer/1000 m <sup>2</sup> (in h)	> 33	17	17,5

Als Grundlage für Handmessungen wurde ein 11 m<sup>2</sup> großes Testfeld mit jeweils einem kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitenden Sensor per Hand untersucht und zudem mit Erfahrungswerten von Kollegen verglichen. Daraus wurde ein ungefährender Messzeitbereich abgeschätzt. Diese Werte wurden unter der Annahme eines pausenlosen Messvorgangs auf 100 bzw. 1000 m<sup>2</sup> hochgerechnet. Bei den Messzeiten, automatisiert oder per Hand, sind Vorbereitungszeiten beispielsweise für Aufmass, Anzeichnung von Messfeldern oder Kalibrierung von Messgeräten nicht berücksichtigt. Desgleichen sind keinerlei Pausenzeiten und Zeiten für die Auswertung bzw. Anzeige von Messdaten enthalten.

Zum Vergleich wurde dasselbe Testfeld mit automatisierten Messungen untersucht, sowie die fiktiven Messzeiten der Simulationsmessungen (Abschnitt 9.6.2.3) ermittelt. Die maximale Fahrgeschwindigkeit des automatisierten Systems wurde in diesen Versuchen auf 0,2 m/s beschränkt, um vergleichbare Werte zu erhalten. Simulation und reale Messung stimmen hier gut überein, was die realitätsnahe Modellbildung der Simulation bestätigt.

Es zeigt sich, dass für kleine Messfelder der Zeitaufwand für kontinuierliche Messverfahren erwartungsgemäß ähnlich groß ist wie der eines automatisierten Systems. Erst bei größeren Flächen lässt sich der Mehraufwand (beispielsweise durch Anschaffung und Einsatz von Technik) für die Automatisierung rechtfertigen, wenn man zudem berücksichtigt, dass bei einem automatisierten System mehrere Messverfahren gleichzeitig eingesetzt werden können.

Bei den diskontinuierlichen Punktmessungen fällt der Unterschied viel deutlicher aus. Es ist davon auszugehen, dass eine manuelle Punktmessung auf 1000 m<sup>2</sup> in einem 0,5 m Raster über 33 Stunden (entsprechend etwa vier Arbeitstagen) gar nicht erst ausgeführt würde. Ein automatisiertes System käme mit eineinhalb Arbeitstagen aus.

Der wesentliche Vorteil der Automatisierung besteht darin, dass mehrere kontinuierlich messenden Sensoren parallel eingesetzt werden können, und somit kein zusätzlicher zeitlicher Aufwand für die Abtastung der gleichen Messfläche mit unterschiedlichen Messgeräten entsteht.

## 4.6 Messwertabweichungen und Aussagesicherheit

Jeder Messwert ist fehlerbehaftet. Durch eine Vielzahl von externen wie internen Einflüssen auf ein Messsystem können Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem wahren Wert einer Messgröße auftreten; dies wird als sogenannte Messabweichung bezeichnet (veraltete Bezeichnung: Messfehler). Alle Abweichungen, deren Einfluss sich bei wiederholter Messung im Mittel nicht aufheben, werden als systematische Messabweichungen bezeichnet. Zufällige Messabweichungen (beispielsweise Rauschen) entstehen auch bei (theoretisch unendlich vielen) Wiederholungsmessungen; unter gleichen Bedingungen gleichen sie sich im Mittel aus [GUM2008].

Die folgenden Abschnitte beschreiben systematische und zufällige Abweichungen, die bei den jeweiligen Verfahren bekannt sind und auftreten können. **Hinzu kommen neue (systematische und zufällige) Abweichungen, die durch die Automatisierung der Verfahren entstehen können.**

Die Aussagesicherheit ist der Grad, mit der eine getroffene Aussage mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Sie wird in dieser Arbeit nicht als mathematische Größe behandelt.

In vielen Fällen wird eine Erhöhung der Aussagesicherheit einer Prüfaussage durch die Ermittlung von Randbedingungen durch andere Verfahren oder durch den Vergleich der Messergebnisse zweier unterschiedlicher Verfahren für die gleiche Messgröße gewonnen.

### 4.6.1 Potentialfeldmessung und DP-Messung

Die Aussagefähigkeit der Potentialfeldmessung wird einerseits durch den elektrolytischen Widerstand und durch die Betondeckung andererseits beeinflusst. Bei hohen Widerständen kann es zu deutlichen Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Potential der Bewehrung und dem gemessenen Potential kommen. Dabei reicht es schon aus, wenn der unmittelbare Oberflächenbereich (z. B. 0,5 bis 1 cm Tiefe) des Bauteils stark ausgetrocknet ist. Wird eine solche Oberfläche befeuchtet, werden nicht selten Änderungen im Messsignal von bis zu 100 mV festgestellt [Mietz2004]. Die Potentialänderung erfolgt dabei nicht plötzlich, sondern über einen Zeitraum von einigen Minuten. Beim Abtasten größerer Flächen kann dies bereits zu einem erkennbaren Einfluss führen, da der Zeitraum zwischen Befeuchtung und Messung zwangsläufig unterschiedlich ist. Bei direkter intensiver Sonneneinstrahlung können

Teilbereiche bereits wieder abtrocknen, bevor eine Messung erfolgt ist. Insbesondere bei regelmäßigen Wiederholungsmessungen an Objekten ist auf vergleichbare äußere Bedingungen zu achten. In diesem Zusammenhang ist auch die Temperaturabhängigkeit der gemessenen Potentiale zu berücksichtigen. Sowohl die elektrochemischen Reaktionen an der Bewehrung als auch das Potential der Bezugselektrode werden beeinflusst. Temperaturabweichungen unter 10 K können im Allgemeinen vernachlässigt werden.

Sind vergleichbare Bedingungen nicht gewährleistet, muss deren möglicher Einfluss auf die Ergebnisse besondere Aufmerksamkeit finden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Hier bietet die in dieser Arbeit beschriebene Multisensorik den Vorteil, dass die oberflächennahe Feuchte und Temperatur permanent erfasst und kontrolliert werden können (vgl. Kapitel 4.4.2), um die Aussagesicherheit zu erhöhen.

Änderungen des Feuchtigkeitsangebotes im unmittelbaren Bereich der Bewehrung haben unter Witterungsbedingungen im Freien dagegen kaum einen Einfluss auf das Messergebnis, da die Feuchtigkeit in Bereichen ab 2 cm Tiefe durch jahreszeitliche Schwankungen kaum beeinflusst wird. Bei üblichen Betondeckungen von 3 cm und darüber haben derartige Veränderungen deshalb keinen Einfluss auf die Potentiallage, solange keine wesentlichen Veränderungen am Objekt vorgenommen werden.

Auf kunststoff- oder epoxydharzbeschichteten Betonoberflächen ist eine Potentialfeldmessung nicht möglich, da eine elektrolytische Verbindung zum Beton nicht hergestellt werden kann. Einfache Farbanstriche behindern die Messung hingegen nicht [Mietz2004]

Messtechnisch ist auf eine gute Ankopplung zum Bewehrungsstahl (kleiner 1 Ohm) und auf eine ausreichende Sättigung der Kupfer/Kupfersulfatelektrode (es müssen noch Kristalle sichtbar sein) zu achten. Das verwendete Messgerät sollte einen sehr hohen Eingangswiderstand von mindestens 10 M $\Omega$  aufweisen (Geräte mit bis zu 1 G $\Omega$  sind kommerziell verfügbar), um systematische Abweichungen zu vermeiden.

Bei der Benutzung einer Radelektrode sind grobe Verschmutzungen der Objektoberfläche vorab zu beseitigen. Während einer Messung sollte die Lauffläche der Radelektrode auf nichtleitende Anhaftungen geprüft werden.

Eine sehr gleichmäßige, langsame Bewegung ist für die großflächige Untersuchung von Vorteil, auch wenn dies einer hohen Flächenleistung entgegenwirkt, da sich ein Messwert bei sehr hochohmigen Messgeräten unter Umständen sehr langsam einstellt (Einschwingvorgang, Messzyklus des Voltmeters).

Letztendlich werden stets Sondierungsöffnungen und Chloridanalysen ausgeführt, um die aufgefundenen Anzeigen zu verifizieren.

Alle getroffenen Aussagen (mit Ausnahme der Bewehrungsankopplung) gelten auch für die Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung).

Trotz sorgfältiger Durchführung werden in der Praxis bei Potentialfeldmessungen Unsicherheiten der Potentialwerte von  $\Delta U_x = 50$  mV beobachtet [Angst2009]. Gleichung (17)

liefert die mathematische Beschreibung der Messunsicherheit für die DP-Messung. Für die Addition bzw. Subtraktion zweier Eingangsgrößen (hier Potential) mit deren voneinander unabhängigen Unsicherheiten (hier  $\Delta U_x$ ) gilt für die Gesamtunsicherheit nach [GUM2008]:

$$\Delta U_{ges} = \sqrt{\Delta U_1^2 + \Delta U_2^2} \quad \text{bzw.} \quad \Delta U_{ges} = 1,4 \cdot \Delta U_1 \quad \text{für} \quad \Delta U_1 = \Delta U_2 \quad (17)$$

Die Messunsicherheit der Messwerte einer DP-Messung liegt also um den Faktor 1,4 höher als die einer Potentialfeldmessung.

#### 4.6.2 Betondeckungsmessung mit dem Wirbelstromverfahren

Grundsätzlich ist vor einer Betondeckungsmessung der Stabdurchmesser der zu untersuchenden Bewehrung zu ermitteln und am Gerät als Korrekturwert einzustellen. Hierzu gibt es am Gerät einen eigenen Messmodus zur zerstörungsfreien Ermittlung des Stabdurchmessers. Alternativ kann der Stabdurchmesser auch durch Freilegen der Bewehrung ermittelt werden. Ein falsch eingestellter Wert kann zu erheblichen Abweichungen vom wahren Betondeckungswert führen (systematische Abweichung bis zu einem Zentimeter).

Einzelstäbe können bei der Abtastung der Oberfläche nur aufgelöst werden, wenn der Abstand zwischen benachbarten Stäben größer als die Tiefenlage der Bewehrung ist. Im Allgemeinen sollte für eine exakte Bestimmung der Betondeckung der Abstand der Bewehrungsstäbe das Zweieinhalbfache der Betondeckung betragen [Flohrer2004].

Bei mehrlagigen Bewehrungen kann nur die oberste Lage erkannt werden; dies gilt auch an Kreuzungspunkten (Mattenbewehrung) und für andere Stahleinlagen.

Betondeckungsmessgeräte sind im Allgemeinen temperaturkompensiert, nur bei starken Schwankungen der Umgebungstemperatur sollte ein wiederholter Nullabgleich durchgeführt werden. Dies ist insbesondere auch bei großflächigen, automatisierten Anwendungen über lange Zeiträume zu beachten.

Um einen Verschleiß des Messkopfes durch Reibung an der Oberfläche einer zu untersuchenden Betonfläche zu verhindern, sollte bei einem automatisierten System der Messkopf in einem definierten Abstand, also mit Luftspalt, befestigt werden.

Dies führt allerdings zu einem Verlust an Tiefenauflösung, da die übliche Tiefenreichweite von ca. 10 cm (je nach System bis zu 20 cm) um den Abstand zur Betonoberfläche verringert wird. Auch kann bei einer automatisierten Messfahrt nicht unbedingt sichergestellt werden, dass dieser Abstand konstant bleibt, da durch Unebenheiten der Untersuchungsfläche sowie durch Neigungen eines automatisierten Systems die Distanz des Messkopfes zur Oberfläche unter Umständen um etliche Millimeter schwankt.

Um diese systematische Abweichung zu eliminieren, muss der Abstand am Ort des Sensorkopfes beispielsweise mit einem optischen Distanzmesser permanent (und

berührungslos) gemessen werden, wenn der wahre Wert der Betondeckung berechnet werden soll.

### **4.6.3 Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren**

Die Feuchte eines Bauteils kann nur oberflächennah gemessen werden. Im Idealfall werden Sensoren mit unterschiedlicher Eindringtiefe parallel verwendet, um ein Tiefenprofil erstellen zu können. Gleichzeitig erhöht diese Maßnahme die Aussagesicherheit der Feuchtwerte. Der Vorteil, die Bauteilfeuchte mit dem Mikrowellenverfahren zu ermitteln, liegt vor allem darin, dass die Messwerte praktisch unabhängig von der ionischen Leitfähigkeit und damit vom Salzgehalt des Bauteils sind.

Problematisch ist die Aussagekraft der internen Berechnung der tatsächlichen relativen Feuchtigkeit im Messgerät. Als Hilfsgröße wird hier ein sogenannter Feuchteindexwert aus dem Reflexionsfaktor (Quotient der hin- und rücklaufenden Welle) ermittelt. Über Kalibrierkurven, die für das jeweilige Material im Labor erstellt werden müssen, wird dann unter der Annahme der Untersuchung eines homogenen Mediums die relative Bauteilfeuchte bestimmt.

Es empfiehlt sich, mit vergleichenden (zerstörenden) Feuchtemessungen die Messwerte zu überprüfen, da nicht für jeden Betontyp entsprechende Kalibrierkurven vorliegen. Für die Darstellung einer lokalen Feuchteverteilung im Sinne einer qualitativen Analyse reicht allerdings der Feuchteindexwert aus, um durchfeuchtete Bereiche sicher eingrenzen zu können.

Als Temperaturkompensation zur Beibehaltung der Messgenauigkeit wird die Antenne über ein Heizelement, das per Thermostat gesteuert wird, beheizt. Als Sollwert ist eine Temperatur einzustellen, die knapp über der maximal zu erwartenden Umgebungstemperatur liegen sollte. Diese Maßnahme dient der Vermeidung von systematischen Messabweichungen durch eine Temperaturänderung der Umgebung.

Anders als bei Handmessungen sollte bei der Automatisierung des Verfahrens der Sensorkopf mit einem Luftspalt über der zu untersuchenden Oberfläche installiert werden, um Verschleiß durch Abrieb zu vermeiden. Ist dieser Abstand des Luftspalts zu groß, kann es Probleme bei der Einkopplung von hinreichend Sendeenergie durch Reflexionen an der Bauteiloberfläche geben. Für Messungen sollte versucht werden, diesen Abstand zur Vermeidung von systematischen Abweichungen so klein wie möglich einzustellen. Zur Vermeidung von externen Störungen (zufällige Abweichungen) sollte zusätzlich am Antennenrand eine leitfähige Bürstendichtung angebracht werden. Diese kann auch die Führung der internen Welle zur Einkopplung in das Bauteil verbessern.

### **4.6.4 Positionsbestimmung**

Eine typische Positionsgenauigkeit eines Laserscanners wird herstellerseitig mit +/- 1 cm auf 30 m (Reichweite des Lasers) und 1° Grad Raumwinkel angegeben. Sehr gute Tachymeter

liefern eine Genauigkeit von  $\pm 1$  cm auf bis zu 1.000 m Reichweite, geben aber prinzipbedingt keine Orientierung im Raum wieder. Diese Genauigkeiten sind im Allgemeinen für ein automatisiertes Messsystem zur Positionsbestimmung im Bauwesen ausreichend.

Bei halbautomatischen Systemen werden typischerweise mit Winkelcodierern ausgestattete Messräder zur Erfassung des Weges in Messspurrichtung mit Genauigkeiten im Millimeterbereich verwendet. Abweichungen treten im Allgemeinen durch ungewollte Raddrehungen beim Versatz zwischen Messlinien oder durch den lateralen Versatz von Messlinien untereinander auf. Durch die Aufzeichnung von Hilfslinien oder den Einsatz von Orientierungslasern können diese Abweichungen reduziert werden. Die Orientierung eines Sensors im Raum wird manuell erfasst und muss bei mäandrierenden Messspuren berücksichtigt werden.

Können neben diesen globalen Positionsdaten wie bei dem in Kapitel 2.3.3 beschriebenen System noch zusätzlich Odometriedaten von Antriebsrädern eines automatisierten Systems zur Positionsbestimmung (Scan-Matching) herangezogen werden, so kann die Zuverlässigkeit dieser Daten noch weiter verbessert werden. Bei einem solchen System kann alle 50 ms eine aktualisierte Pose vom Navigationssystem ermittelt und an der Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Im Gegensatz zu den mit Winkelcodierern ausgestatteten Messrädern werden dabei die absoluten Positionsdaten in allen Richtungen sowie die Orientierung im Raum erfasst. Diese Genauigkeit kann nach umfangreichen Tests und Erfahrungen mit dem System auch erreicht werden, wenn folgende Gegebenheiten berücksichtigt werden:

- Es müssen ausreichend eindeutige positionsfeste Objekte mit winkligen Umrissen als Referenzpunkte vorhanden sein. Die Säulen von Parkhäusern erweisen sich hier als sehr vorteilhaft.
- Bei der obligatorischen Orientierungsfahrt eines solchen automatisierten Systems vor dem Messbeginn sind die erfassten Objekte sorgfältig einzutragen und durch Anfahren aus unterschiedlichen Richtungen zu verifizieren. Dabei darf das System aber nicht überbestimmt werden, da sich sonst der Rechenaufwand des Navigationsrechners deutlich erhöht, was bei höheren Fahrgeschwindigkeiten durch das Fehlen von Zwischenwerten erkennbar wird.
- Für sehr große Freiflächen (Brückendecks, Straßen, Flugzeughangar) können temporäre Landmarken beispielsweise in Form von Pylonen verwendet werden.



# 5 Praktische Anwendung

## 5.1 Anwendung 1: Großer Betonprobekörper (GBP) BAM

Der große Betonprobekörper dem BAM (GBP, Abbildung 5-1) dient für viele Prüfaufgaben als Referenzobjekt. Um dem bestehenden Bedarf an Vergleich und Bewertung von Prüfverfahren gerecht zu werden, wurde an der BAM ein großflächiger Betonprobekörper in Form einer Stahlbetonplatte hergestellt. Mit seinen Abmessungen von 10 m x 4 m und einer Bauteildicke von 0,3 m, die in bestimmten Bereichen variiert wird, ist er groß genug, um Randstörungen bei Messergebnissen zu minimieren. Er trägt mit seinen Einbauten und künstlichen Fehlstellen dazu bei, dass hier typische Prüfaufgaben vorgenommen werden können.

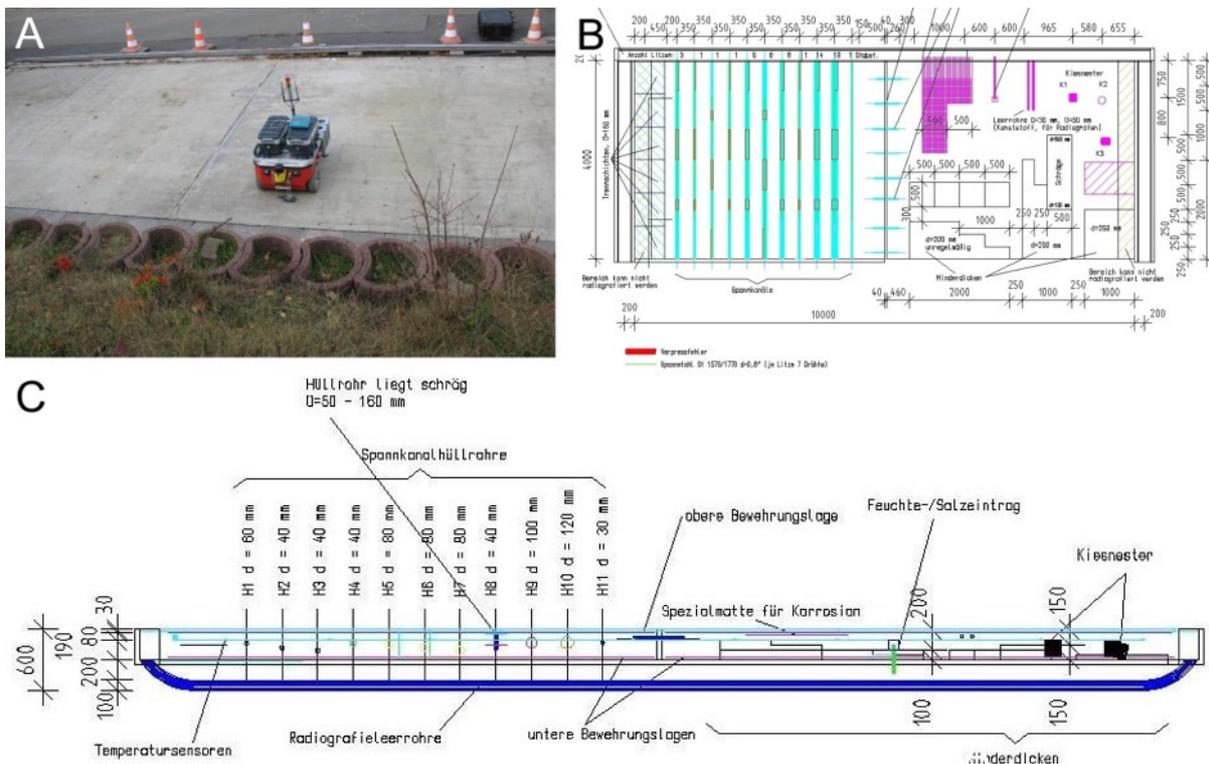


Abbildung 5-1 A: Großer Betonprobekörper mit Roboterplattform, B: Grundriss mit Einbauten, C: Querschnitt

Ein Abschnitt des Betonprobekörpers umfasst Hüllrohre verschiedenen Durchmessers und Variationen der Betonüberdeckungen. Die Hüllrohre weisen eine unterschiedliche Anzahl von Spannstahlitzen auf. Sie sind mit Zementmörtel verpresst, an definierten Stellen sind künstliche Einpressfehler hergestellt worden. Ein anderer Abschnitt der Betonplatte umfasst Bereiche mit Minderdicken und Fehlstellen wie Hohlräume oder Kiesnester. Zusätzlich wurden Thermolemente, Injektionsschläuche und Korrosionsmatten eingebaut. Die genaue Kenntnis der Geometrie und der Lage von Fehlstellen erlaubt einen Methodenvergleich, die

Verfahrenskombination verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren und die Kalibrierung von Geräten [BAM-GBP].

Die eingebrachte Korrosionsmatte mit freiliegenden externen Anschlüssen dient als Referenz für die Potentialfeldmessung. Hier wurden mehrfach wässrige Lösungen mit hohen Chloridkonzentration nach der Herstellung injiziert. Die Betondeckung der Korrosionsmatte beträgt durchschnittlich 5 cm.

### 5.1.1 Automatisierte Anwendung der DP-Messung

Innerhalb des BetoScan Forschungsvorhabens [BetoScan] wurde vom Verfasser die automatisierte Potentialfeldmessung entwickelt. Die Notwendigkeit eines Schleppkabels für den ansonsten vollkommen autonomen, batteriebetriebenen und per WLAN kommunizierenden Roboter sollte unbedingt vermieden werden. Durch die Verwendung von zwei Radelektroden konnte schließlich auch die Differenzpotentialfeldmessung automatisiert werden, die das freie Navigieren des Roboters nicht behindert.

Die Potentialfeldmessung wurde in einem Messfeld von 1,5 m x 5 m im Bereich um die Korrosionsmatte (vgl. violetter Bereich in Abbildung 5-1 B) durchgeführt. Der Messspurabstand betrug 0,1 m, in Fahrtrichtung wurde jeden Zentimeter ein Wert ermittelt. Der Anschluss an die Bewehrung wurde mit einem Schleppkabel hergestellt (Abbildung 5-2). Abbildung 5-4 A zeigt, dass im mittleren Bereich des Messfeldes eine Stelle mit Spannungen im absoluten Minimum um -300 mV vorhanden ist, die wahrscheinlich auf eine Korrosionsaktivität des Bewehrungsstahls schließen lässt.

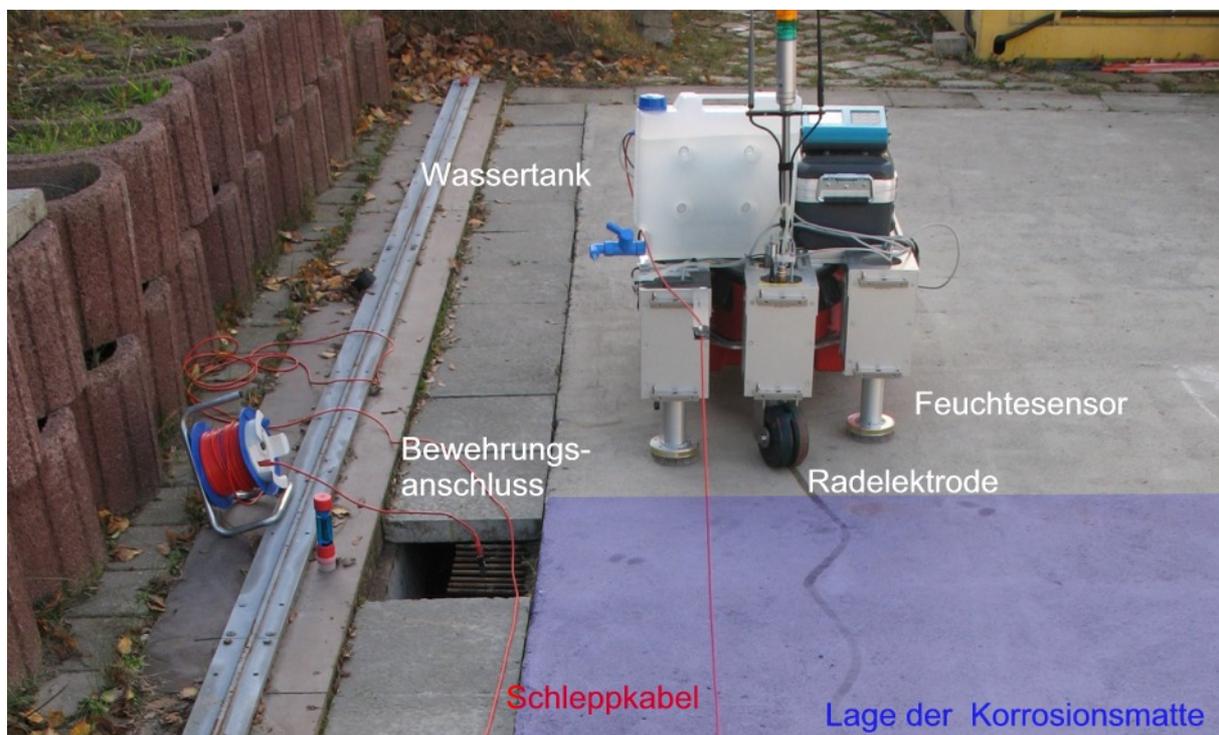
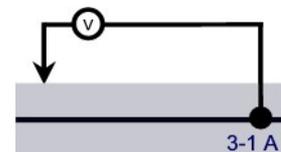


Abbildung 5-2 Roboter bei der Potentialfeldmessung mit gleichzeitiger Ermittlung der Feuchteverteilung und Betondeckung

Durch die Automatisierung des Verfahrens konnte die Potentialfeldverteilung in kürzerer Zeit und mit einer erheblich größeren Messpunktdichte aufgenommen werden als es bei Handmessungen gefordert ist (vgl. Tabelle 3). Die Aussagesicherheit des Verfahrens wurde somit in den Bereich „hoher Ansprüche zur Detektion kleiner Anzeigen“ [DGZFP2008] gesteigert.

Als erste Messung wurde eine Messung der Feuchteverteilung vor der für die Potentialfeldmessung notwendigen Wässerung vorgenommen. Die Messung der Bauteilfeuchte während einer Potentialfeldmessung dient als Selbstkontrolle, um eine ggf. auftretende zu schnelle Abtrocknung der Fläche (vgl. Kapitel 4.6.1) zu bemerken.

Um die praktische Anwendbarkeit der Differenzpotentialfeldmessung nachzuweisen, wurde der gleiche Messbereich mit der Differenzpotentialfeldmessung mit zwei Radelektroden (Abbildung 5-3) mit dem gleichen Messspurabstand untersucht.

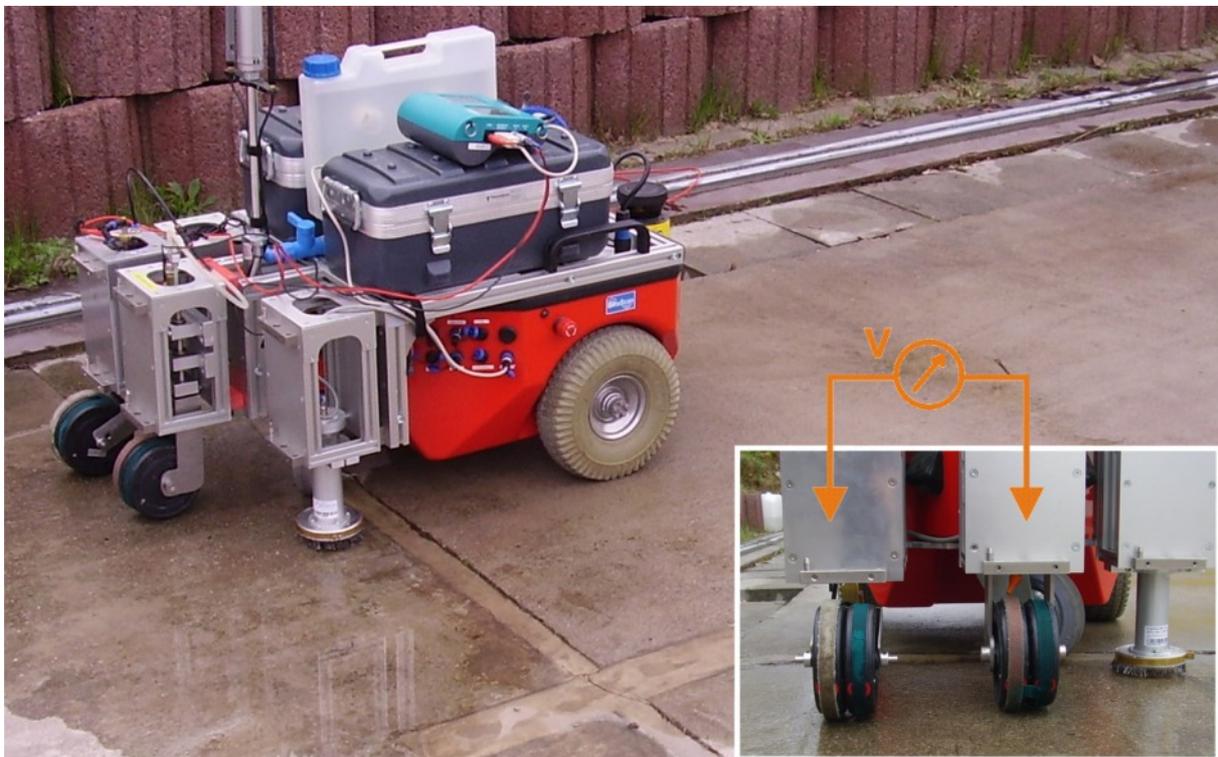
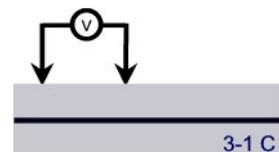


Abbildung 5-3 Roboter beim Einsatz der Differenzpotentialfeldmessung mit zwei Radelektroden ohne Bewehrungsanschluss, gleichzeitig wird die oberflächennahe Betonfeuchte und die Betondeckung ermittelt.

Da bei diesem Verfahren kein direkter Anschluss zur Bewehrung hergestellt wird, wurden vor Beginn der Messungen außerhalb der Korrosionsmatte die Einzelspannungen (der Offset) der Radelektroden gegenüber der Bewehrung ermittelt. Dieser Basiswert ist für den Vergleich der mit den Werten der Potentialfeldmessung durch Integrationsrechnung notwendig.

Als Messort (Offset des Sensors zum Koordinatenursprung der Roboterplattform) wurde der Mittelpunkt zwischen beiden Radelektroden, die in einem Abstand von 0,2 m positioniert wurden (vgl. im Anhang Abbildung 9-11 B, Position 3 und 6), festgelegt.

Abbildung 5-4 A zeigt die Potentialfeldverteilung im Vergleich zu den Spannungen, die mit der Zweirad-Differenz-Anordnung aufgenommen wurden (Abbildung 5-4 B). Am Ort des lokalen Minimums der Potentialfeldmessung zeigt sich der signifikante Minimum-Maximum-Spannungsverlauf (Gradientensignatur) mit Vorzeichenwechsel, wie er gemäß den theoretischen Überlegungen in Kapitel 3.2 und den Voruntersuchungen am Probekörper (Kapitel 3.3.3) erwartet wurde.

Die Berechnung des Integrals der Differenzpotentialwerte (Abbildung 5-4 C) liefert eine Verteilung, die der Potentialfeldmessung entspricht. Am Ort ( $x=4,1$  m /  $y=-2,2$  m) befindet sich ein lokales Minimum von  $U_{\text{Pot}} = -350$  mV. Anhand der vorgestellten Bewertungskriterien gemäß Abbildung 2-5 lässt sich damit keine eindeutige Zuordnung zu einem Zustand des Bewehrungsstahls treffen. Gemäß der Bewertung nach [DGZFP2008] kann es sich um Lochfraßkorrosion durch Chloride oder einen passiven Zustand der Bewehrung ohne Chloride handeln. Die Skalen nach [RILEM-TC154] lassen für  $U_{\text{Pot}} = -350$  mV gar keine Zuordnung zu. Ohne das Vorwissen, dass hier ein massiver Chlorideintrag stattgefunden hat, oder Probeentnahmen zur Chloridanalyse kann keine Aussage zum Zustand der Bewehrung getroffen werden.

Die Potentialverteilung (Abbildung 5-4 B), die durch Integration (vgl. Kapitel 3.2.3) der Differenzpotentialfeldmessung ermittelt wurde, zeigt ungefähr den gleichen Extremwert des Potentialtrichters von  $U_{\text{min}} = -320$  mV. Auch befindet sich das Zentrum des Potentialtrichters am gleichen Messort. Mehr Information über den Zustand der Bewehrung kann aus dieser Art der Auswertung aber nicht gewonnen werden, da in diesem Fall die gleichen Bewertungskriterien wie zuvor ausgeführt zugrunde gelegt werden müssen.

Anders im Falle der Betrachtung des Gradienten (Abbildung 5-4 D). Die Absolutwerte liegen deutlich über dem in [Lay2003] und [Steck2006] beschriebenen Kriterium von 100 bzw. 200 mV / m. Die lokalen Extremstellen der Gradientensignatur weisen absolute Werte von mehr als 500 mV / m auf. Der Abstand zwischen lokalem Minimum und Maximum der gut zu erkennenden Gradientensignatur entspricht dem gewählten Elektrodenabstand von 0,2 m.

Es ist mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass zum Zeitpunkt der Messung aktive Korrosion am Ort des Nulldurchgangs der Gradientensignatur stattgefunden hat.

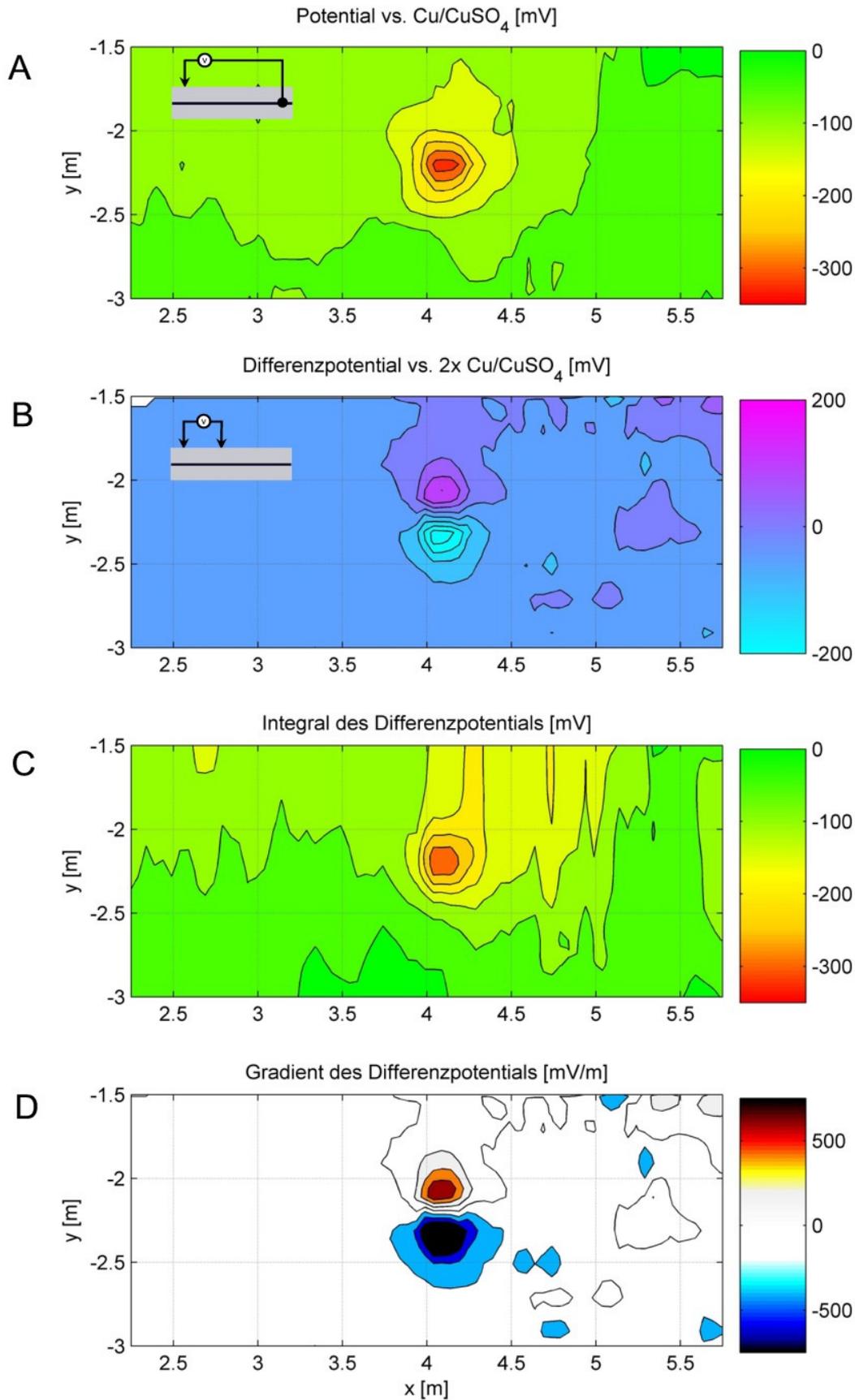


Abbildung 5-4 Darstellung der Potentiale (A), der Differenzpotentiale (B), des Integrals der Differenzpotentiale (C) und des Gradienten der Differenzpotentiale (D) (Orientierung des Elektrodenpaares in  $y$ -Richtung, Abstand  $w = 20$  cm)

## 5.1.2 Betondeckung und Bauteilfeuchte

Parallel zu den DP-Messungen wurden am GBP Betondeckungs- und Feuchtemessungen durchgeführt.

Abbildung 5-5 zeigt im Bereich der mutmaßlichen korrosionsaktiven Anode einen vergrößerten Ausschnitt der Betondeckungsmessungen zusammen mit den Äquipotentiallinien der Potentialfeldmessung. Die Farbskalierung der Betondeckungsmesswerte wurde so gewählt, dass die Gitterstruktur und die Maschen der Bewehrungsmatte gut zu erkennen sind. Verfahrensbedingt gibt die Abbildung nicht die wahren Durchmesser der Bewehrungsstäbe (12 mm) wieder. Typischerweise erscheinen die Stäbe als 100 mm breite Werteplateaus, können aber dem Mittelpunkt eines Werteplateaus zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2.2.2, Abbildung 2-6 B).

Es wird deutlich, dass im Zentrum der mutmaßlichen korrosionsaktiven Anode das Wirbelstromverfahren keine zuverlässigen Werte für die Betondeckung liefert, denn hier sollte die gleiche Mattenstruktur erkennbar sein.

Dies lässt sich damit erklären, dass sich entweder in einer Eisenoxidschicht auf dem Bewehrungsstahl keine Wirbelströme ausbilden können und somit die Anzeige verfälscht ist, oder dass der Bewehrungsstahl in diesen Bereichen bereits durch Lochfraß erheblich geschädigt ist.

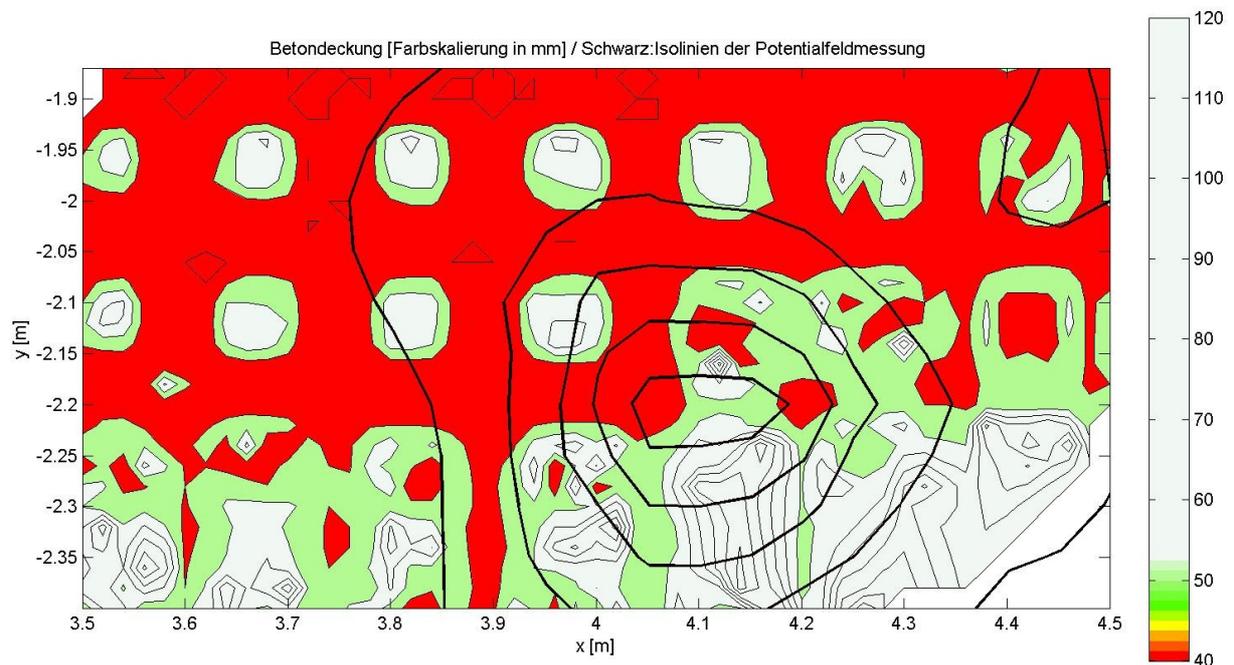


Abbildung 5-5 Ergebnis der Betondeckungsmessung am GBP, vergrößerte Darstellung des Bereichs mit aktiver Korrosion in Kombination mit den Isolinien der Potentialfeldmessung

Die ermittelten Werte von durchschnittlich 4,1 cm Betondeckung im ungestörten Bereich legen die Vermutung nahe, dass hohe Chloridkonzentrationen bis zur Bewehrung vordringen und dort die Korrosion nach den in Kapitel 2.1.1.1 beschriebenen Mechanismen hervorrufen konnten. Der zum Zeitpunkt der Messung lokalisierte aktive Korrosionsherd befindet sich –

unter der Annahme dass sich die Mattenstruktur gleichförmig fortsetzt – genau über einem Bewehrungsstahl.

Abbildung 5-6 zeigt die Ergebnisse der Messung der Bauteilfeuchte mit den Mikrowellensensoren in zwei unterschiedlichen Eindringtiefen. Da die Messfläche zur Anwendung der Potentialfeldmessung bzw. DP-Messung vorab angefeuchtet werden musste, dienen die Messergebnisse der oberflächennahen Feuchtemessung (bis 4 cm) in erster Linie der Qualitätssicherung der Messung (siehe hierzu Aussagesicherheit der Verfahren, Kapitel 4.6.1). Die Messung der Volumenfeuchte im Bereich bis 20 cm Eindringtiefe zeigt ebenfalls eine relativ gleichförmige Verteilung im Bereich von 0,6 bis 1,1 %.

Die Messergebnisse zeigen, dass der gesamte Bereich als „normal feucht“ eingestuft werden kann (vgl. hierzu Tabelle 1 im Kapitel 2.2.4). Für den gesamten Messzeitraum kann von gleichartigen Bedingungen ausgegangen werden.

Vergleichende (zerstörende) Messungen wurden nicht durchgeführt.

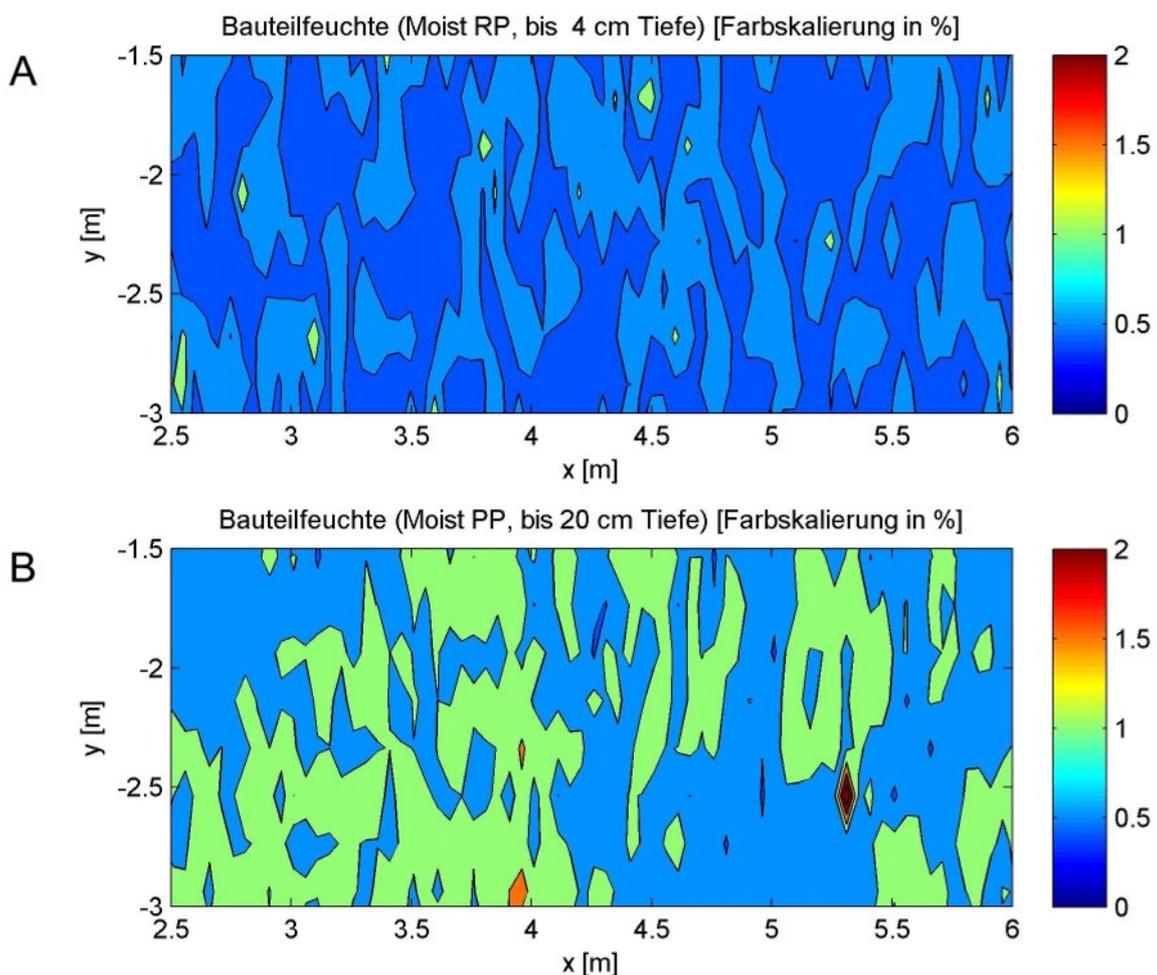


Abbildung 5-6 Ergebnis der Messung der Bauteilfeuchte mit zwei Mikrowellensensoren unterschiedlicher Eindringtiefe ((A) bis 4 cm, (B) bis 20 cm)

### 5.1.3 Luftfeuchte und Umgebungstemperatur

Der Sensor wurde bodennah am Robotersystem montiert. Mit ihm wurde die Luftfeuchte und die Lufttemperatur gleichzeitig und parallel zu den übrigen Messwerten erfasst. Abbildung 5-7 zeigt die Änderung der Luftfeuchte und Umgebungstemperatur während einer einstündigen Messung.

Wie zu erkennen ist, können sich Umgebungsbedingungen bereits innerhalb einer Stunde ändern. Die Änderungen der Temperatur sind hier gering (Abbildung 5-7 B), die relative Luftfeuchte ändert sich dagegen aber im betrachteten Zeitraum um mehr als 15% (Abbildung 5-7 A). Übertragen auf länger dauernde Messungen, die wie die Potentialfeldmessung auf gleichbleibende Randbedingungen angewiesen ist, bedeutet es einen Vorteil, die Klimadaten in die Auswertung einbeziehen zu können, um die Aussagesicherheit zu erhöhen. Eine Abweichung von mehr als 10 K (vgl. Kapitel 4.6.1) hätte beim Vergleich der Messdaten in der Interpretation berücksichtigt werden müssen [Mietz2004].

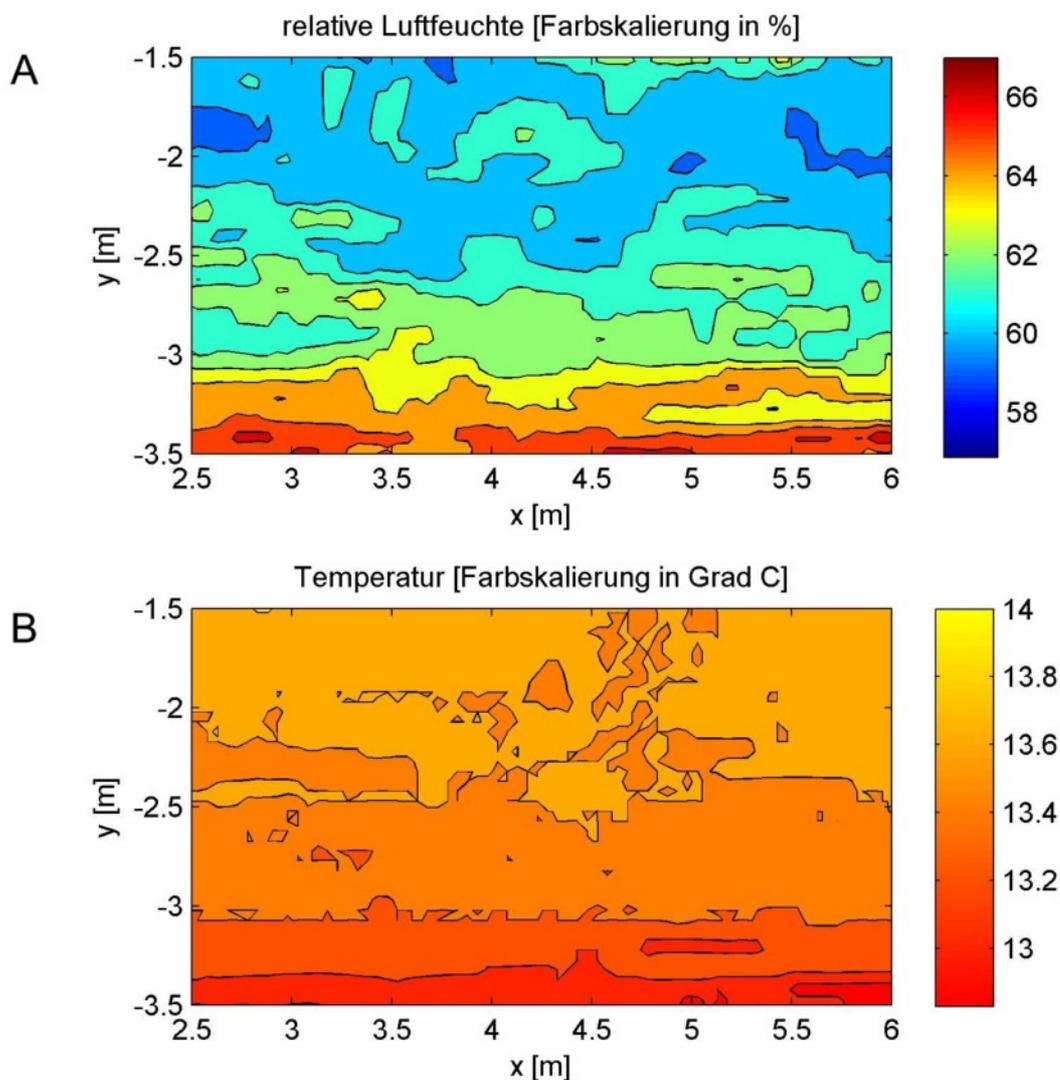


Abbildung 5-7 Ortsreferenziert aufgenommene Messdaten von Luftfeuchte (A) und Umgebungstemperatur (B). Die Messung wurde mit horizontalen mäandrierenden Messspuren (x-Richtung, Start links unten) mit einer Gesamtdauer von einer Stunde durchgeführt.

#### **5.1.4 Wiederholgenauigkeit von Positionsmessungen**

Zur Prüfung der Wiederholgenauigkeit von Positionsmessungen wurden im Rahmen der Voruntersuchungen Messungen mit identischen Messplänen mehrfach wiederholt durchgeführt und stichprobenartig an ausgewählten Haltepunkten die ausgegebenen Positionswerte mit einem Maßband ermittelt.

Empirisch wurden so die maximalen Positionsabweichungen von  $\pm 1$  cm und Winkelabweichungen von  $\pm 1,5$  Grad ermittelt. Dies entspricht den Angaben des Herstellers und ist für großflächige Untersuchungen hinreichend genau. Bei der Verwendung eines Laserscanners muss auf eine ausreichende Anzahl und die Eindeutigkeit von Landmarken geachtet werden.

Exemplarisch wurden vier Messpunkte wiederholt angefahren und die dort jeweils erneut ermittelten Messwerte der eingesetzten Verfahren verglichen. Die ermittelten Abweichungen liegen im Bereich der Messwertabweichung des jeweiligen Messgeräts.

## 5.2 Anwendung 2: Berliner Parkhaus

Als Untersuchungsobjekt für die praktische Anwendung der Multisensorik wurde ein Parkhaus gewählt, bei dem ohne Vorkenntnisse des aktuellen Zustands alle kombinierbaren Verfahren zum Einsatz kommen sollten. Leider konnte aufgrund der nichtleitenden Beschichtung der Oberfläche die Potentialfeldmessung bzw. Differenzpotentialfeldmessung nicht eingesetzt werden. Ursprünglich war angenommen worden, dass es sich nur um eine Farbschicht handelt, die nicht isolierend wirkt. Es war auch nicht erlaubt, Bohrungen vorzunehmen, um an die Bewehrung anzukoppeln.

Als Prüfbereich wurde eine rund 500 m<sup>2</sup> große Fläche (Messfeld 1) im Untergeschoß sowie eine ca. 100 m<sup>2</sup> große Fläche im oberen Geschoß (Messfeld 2) gewählt.



Abbildung 5-8 A: Parkhausuntergeschoss mit Roboterplattform und Rechner zur (zeitnahen) Visualisierung und Steuerung, B: Grundriss des Messfeldes 1 mit nummerierten Einstellplätzen

### 5.2.1 Betondeckungsmessung

Die Betondeckungsmessung wurde mit dem Wirbelstromverfahren durchgeführt. Hierzu wurde das gesamte Messfeld mäanderförmig in zwei zueinander orthogonalen Richtungen befahren. Abbildung 5-9 zeigt den Verlauf der Messspuren bei einem vorgegebenen Fahrspurabstand von 0,2 m. Der Wirbelstromsensor wurde 0,05 m entfernt von der Fahrachse des Roboters platziert. Somit ergeben sich zwei wahre Spurabstände von 0,05 m und 0,15 m gemäß den Überlegungen in Abschnitt 4.1. Die resultierende Messpunktdichte liegt damit im Bereich der in Tabelle 3 geforderten Messpunktdichte für Handmessungen. Unregelmäßigkeiten bzw. Abweichungen von einem geraden Verlauf entstehen durch Korrekturbewegungen der Roboterplattform und betragen bis zu 0,05 m.

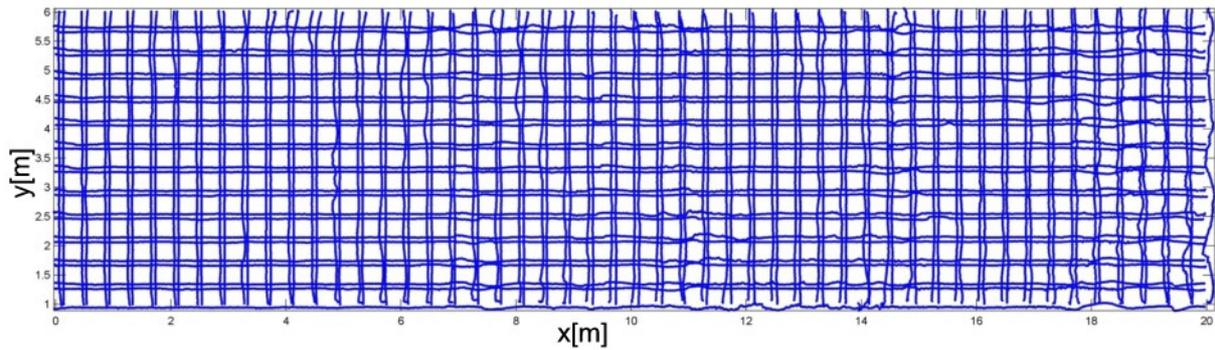


Abbildung 5-9 Orthogonale Messspuren in einem 100 m<sup>2</sup> Prüfbereich (Teil des Messfeldes 1) mit 0,2 m Fahrspurabstand und wahren Spurbständen von 0,05 m und 0,15 m

Die Datensätze beider Fahrtrichtungen wurden überlagert und wie in Abbildung 5-10 A gezeigt, grafisch ausgewertet. Zu beachten ist, dass die Auflösung der Gesamtfläche in einem sehr viel höheren Detailgrad vorliegt, so dass - wie aus der Vergrößerung eines Detailausschnitts (blaues Rechteck) ist Abbildung 5-10 B und C ersichtlich ist - auch die streifen- und maschenförmige Struktur der Bewehrung in einzelnen Bereichen erkennbar wird.

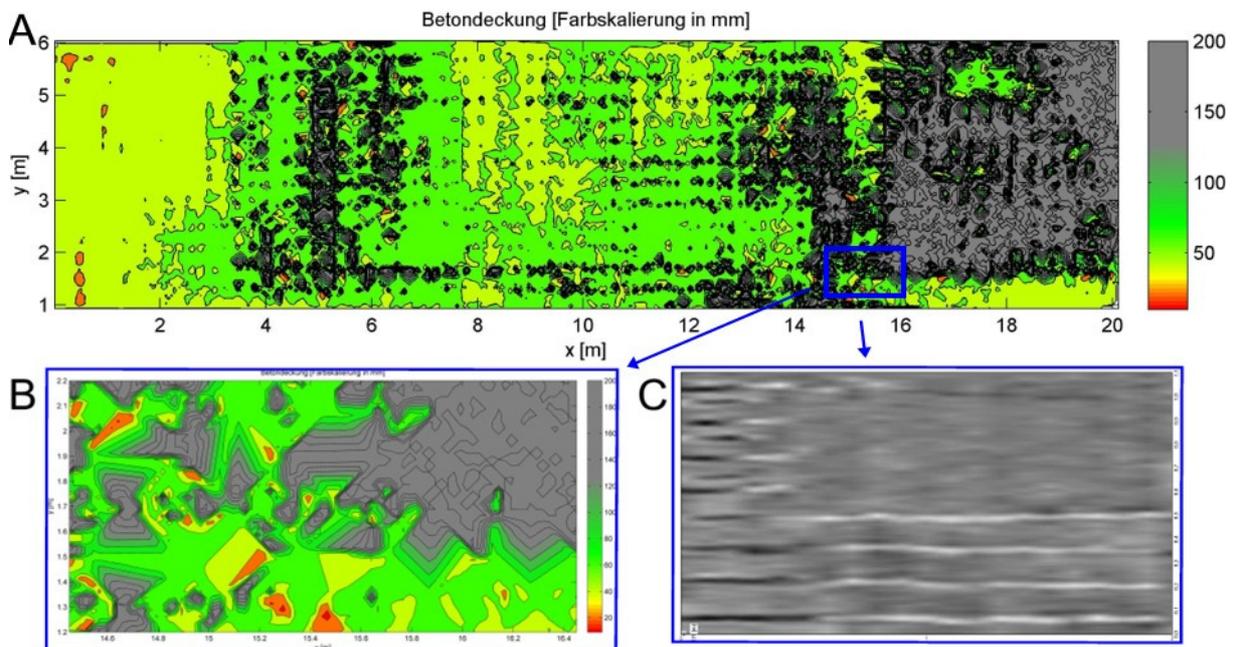


Abbildung 5-10 A: Darstellung der Betondeckungsmessung im Messfeld 1 und Vergleich des vergrößerten Bereiches (blaues Rechteck, B: Wirbelstrom, C: Radar)

Vergleichsdaten, die mit dem Radarverfahren aufgenommen und rekonstruiert wurden (Abbildung 5-10 C), zeigen einen höheren Detailgrad, da hier durch die kürzeren Datenintervalle (vgl. Tabelle 8) eine noch größere Messpunktdichte im mm-Bereich erreicht wird. Für die Detektion von Bereichen mit geringer Betondeckung ist die Messpunktdichte des Wirbelstromverfahrens jedoch ausreichend, da zur Interpretation ohnehin eine Verdichtung der Daten vorgenommen werden muss (siehe Kapitel 5.3.2).

Es ist naheliegend, dass es mit Handmessungen nicht möglich gewesen wäre, eine vollflächige Bestandsaufnahme der Betondeckung in einem angemessenen Zeitrahmen durchzuführen. Viele Bereiche mit geringer Betondeckung wären nicht erfasst worden und eine Bewertung der untersuchten Fläche aufgrund dessen nicht aussagekräftig oder gar falsch. Eine Verbesserung der Aussagesicherheit konnte somit durch die erhöhte Messpunktdichte und nahezu vollflächige Untersuchung erreicht werden.

## 5.2.2 Feuchtemessung

Die stichprobenartige indirekte Bestimmung der Bauteilfeuchte über die Messung der Leitfähigkeit mit einer Wennersonde (vgl. Kapitel 2.2.4) führte aufgrund der isolierenden Beschichtung zu keinem Ergebnis. Hier hat sich die Anwendung des Mikrowellenverfahrens zur Feuchtemessung als vorteilhafter erwiesen. Es kann zum einen berührungslos kontinuierlich angewendet werden, zum anderen ist es aufgrund seines Messprinzips unabhängig von der Beschichtung des zu untersuchenden Bauteils.

Die Messungen mit den Mikrowellenfeuchtesensoren ergaben im Messfeld 1 keine Auffälligkeiten. Im Messfeld 2 wurden zwei Bereiche mit erhöhten Feuchteindexwerten (Farbskala: rot: feucht; blau: trocken) festgestellt, die auch visuell im Bereich eines Abflussrohres und durch einen Salzpfleck identifiziert werden konnten (Abbildung 5-11).

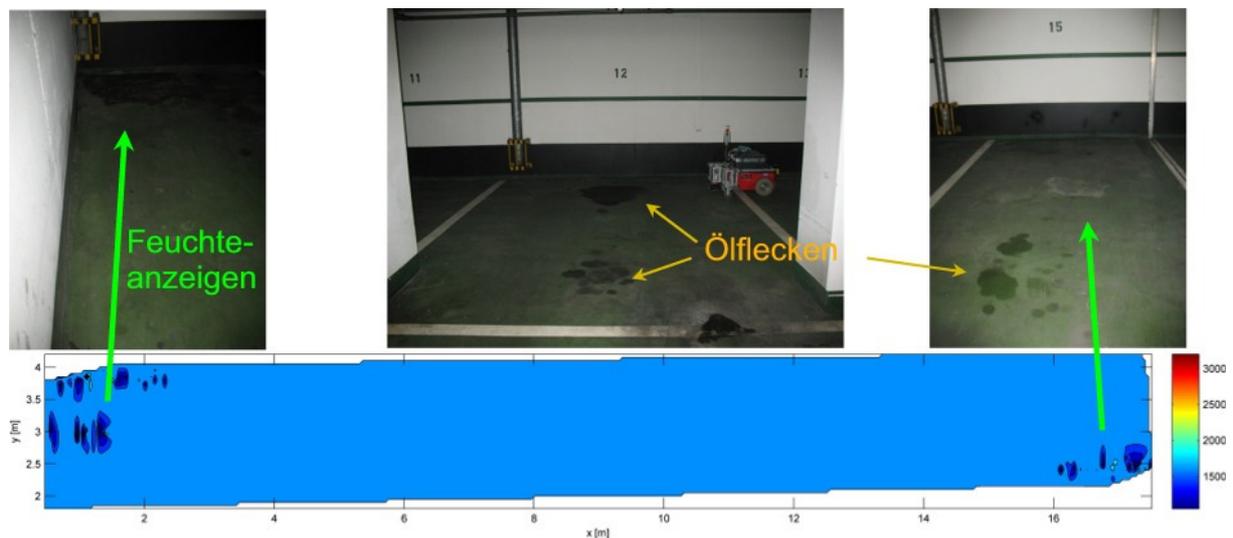


Abbildung 5-11 Flächige Darstellung der Feuchteindexwerte mit Fotos der dazugehörigen Bereiche im Messfeld 2

Gleichzeitig vorhandene eingetrocknete Ölflecken auf der Oberfläche, die sich ad hoc optisch nicht von Feuchteflecken unterscheiden ließen, führten zu keinerlei Anzeige. Die vorhandene Beschichtung hat scheinbar keinen Einfluss auf das Messverfahren, obwohl sich dies mangels (zerstörender) Referenzmessungen durch Bohrproben nicht nachweisen ließ.

### 5.2.3 Bauteildickenmessung

Die Messung der Bauteildicke wurde mit dem Ultraschallecho-Verfahren im Messfeld 2 durchgeführt. Für die Darstellung der Bauteildicken an den einzelnen Messpunkten (Abbildung 5-12) wurde bewusst keine flächige Interpolation gewählt, da der Abstand zwischen den Messpunkten mit 0,5 m größer ist als Strukturen mit möglicherweise unterschiedlicher Bauteildicke. Im oberen Darstellungsbereich ist ein Unterzug anhand der größeren Bauteildicke ( $> 0,7$  m, roter Teil der Farbskala) erkennbar. Die in diesem Bereich ermittelten geringeren Bauteildicken sind auf eine fehlerhafte Ankopplung des Ultraschallkopfes oder auf eine durch die Beschichtung verursachte Totalreflexion des Ultraschallsendesignals zurückzuführen.

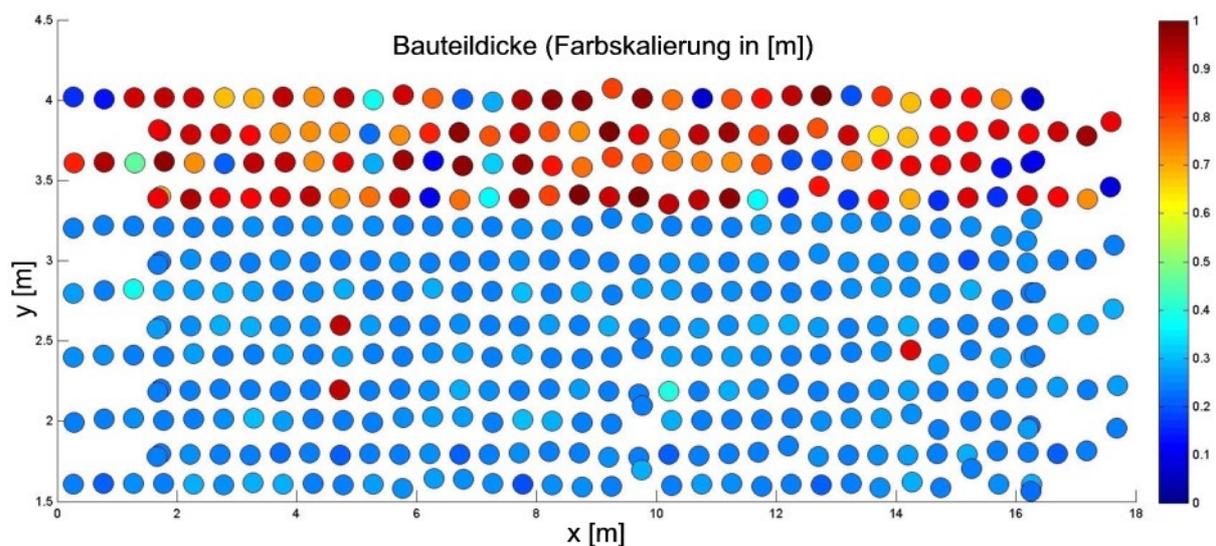


Abbildung 5-12 Messpunkte der ermittelten Bauteildicke im Messfeld 2, Farbskalierung der Bauteildicke in [m]

Die verschiedenen Parameterwerte des Messgerätes wurden vorab durch Kalibriermessungen (Messung der Schallgeschwindigkeit) ermittelt. Im Vergleich zu den stichprobenartig durchgeführten Handmessungen konnte kein Unterschied zu den automatisiert ermittelten Messergebnissen festgestellt werden.

## 5.3 Erfahrungen aus den praktischen Anwendungen

### 5.3.1 Handhabung und Verfahrensabläufe

Die Verwendung einer zweiten Radelektrode stellt keine höheren Anforderungen an die Durchführung einer DP-Messung als bei einer konventionellen Potentialfeldmessung. Durch den symmetrischen mechanischen Aufbau wird ein konstanter Elektrodenabstand auch bei Kurvenbewegungen gewährleistet. Durch das Weglassen des Schleppkabels wird die Messung erheblich vereinfacht. Es sind Messungen auf durch Koppelfugen getrennten Bereichen möglich, ohne dass dies zu beachten wäre.

Die Zeit vom Eintreffen am Messort bis zur Einsatzbereitschaft des Systems einschließlich einer Orientierungsfahrt des Roboters im Messfeld 1 des Parkhauses (500 m<sup>2</sup>) betrug etwa eine halbe Stunde. Für den Anwender wird bei großflächigen Messungen somit bereits der Aufwand für die Vorbereitung der Messungen enorm vereinfacht und verkürzt. Es besteht keine Notwendigkeit, Messlinien aufzuzeichnen, einzumessen und diese dem Messort von Sensordaten manuell zuzuordnen.

Die anschließende Messdauer für eine 100 m<sup>2</sup> große Fläche betrug ca. 90 Minuten für eine Fahrtrichtung bei einem Spurbreite von 0,2 m und entspricht damit umgerechnet in etwa den simulierten und erwarteten Zeiten (vgl. Abschnitt 4.5). Die Fahrgeschwindigkeit wurde an den (langsamsten) Sensor mit dem größten Datenintervall angepasst. Wären ausschließlich die schnelleren Sensoren verwendet worden, hätte sich die Messzeit auf ca. ein Drittel (30 Minuten) verkürzt.

Das Navigationssystem korrigiert ständig durch aufwendige Regelalgorithmen die aktuelle Ist-Position und Geschwindigkeit, um den vom Anwender vorgegebenen Sollfahrspuren zu folgen. Durch falsch gesetzte Regelparameter und hohe Geschwindigkeiten können hierbei unter Umständen laterale Abweichungen von mehreren Zentimetern der Ist-Fahrspur zur Soll-Fahrspur auftreten. Für die ortsreferenzierte Messwerterfassung hat dies aber nahezu keine Auswirkungen, da die Ist-Position korrekt ermittelt und aufgezeichnet wird. Bei der Berechnung der wahren Positionen der Sensoren wurde festgestellt, dass sich durch die Positionierung am Heck der Roboterplattform ein kammförmiger Versatz zwischen den Hin- und Rückfahrspuren einstellt; dadurch ergeben sich im Wendebereich der Fahrspuren größere Fahrspurabstände.

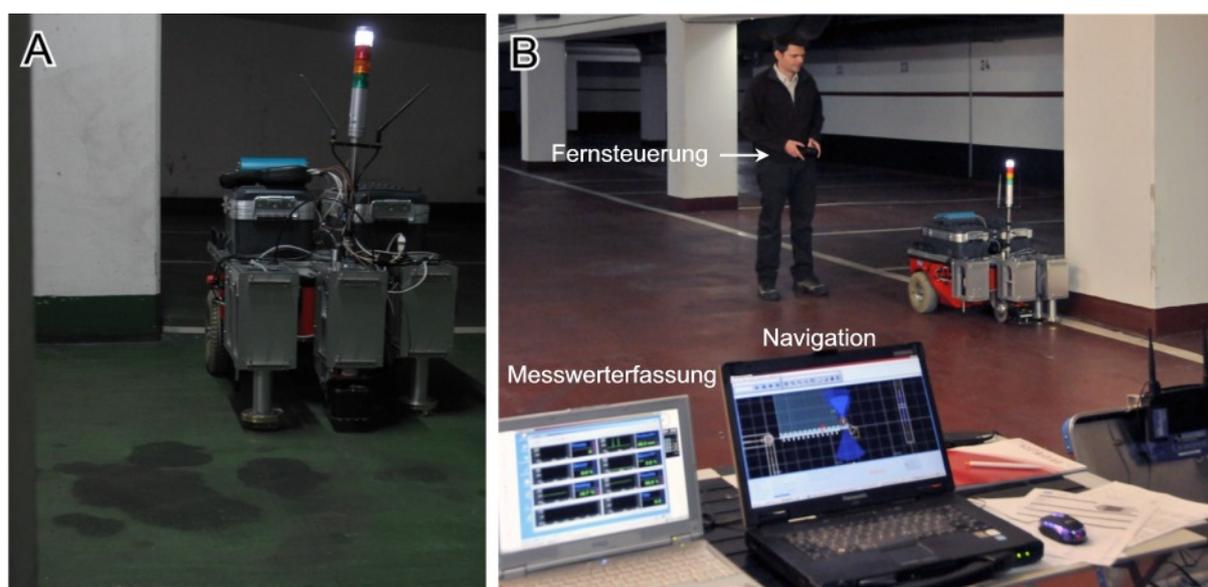


Abbildung 5-13 A: Roboterplattform bei der Navigation an Engstellen, B: halbautomatische Messung mittels Fernsteuerung

Die Roboterplattform ist in der Lage, sehr dicht im Bereich von Engstellen wie Säulen (Abbildung 5-13 A) zu navigieren. Eckbereiche sind schwerer erfassbar, da hier (aus dem Umriss der Plattform definierte) Sicherheitsabstände vom System für Wendemanöver einzuhalten sind.

Hierzu wurde ein halbautomatischer Messmodus entwickelt, bei dem mit einer Fernsteuerung Positionen von Hand angefahren werden können (Abbildung 5-13 B). Dies ermöglicht, Messfelder vollflächig inklusive der Randbereiche zu erfassen, ohne zusätzlich Handmessungen durchführen zu müssen.

Die Batteriekapazität wurde mit 110 Ah ausreichend groß bemessen. Es konnten über zehn Stunden Dauermessbetrieb problemlos absolviert werden.

### 5.3.2 Bildgebende Darstellung

Die üblich flächige, bildgebende Darstellung mit interpolierten Potentialwerten als sogenannte Kontourplots eignet sich auch für die DP-Messung. Für die Farbskalierung ist es sinnvoll den Bereich von  $-200$  bis  $+200$  mV / m neutral (beispielsweise in weiß) und Werte ober- und unterhalb dieser Grenzen durch unterschiedliche Farbverläufe darzustellen.

Gradientensignaturen, die sich durch den Potentialtrichter eines korrosionsaktiven Bereiches ergeben, lassen sich so anhand des Elektrodenabstands  $a$  eindeutig identifizieren.

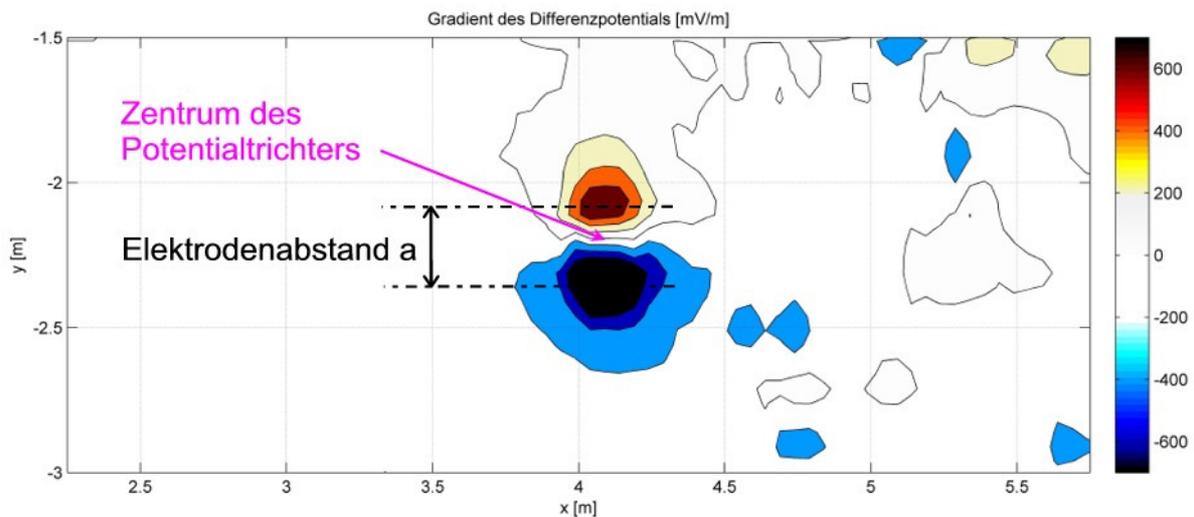


Abbildung 5-14 Darstellung des Gradienten der Differenzpotentiale. Der Abstand der Extremwerte der Gradientensignatur entspricht dem Elektrodenabstand  $a$ . Im Mittelpunkt der Extremwerte liegt das Minimum des Potentialtrichters.

Bei der Verfahrenskombination ist eine geeignete bildgebende Darstellung bei der Auswertung einer Vielzahl von unterschiedlichen Messdaten mit gleichem Ortsbezug ebenfalls wichtig. Damit kann der Anwender eine zuverlässige, einfache und schnelle Sichtung der Daten zur Interpretation der Messergebnisse vornehmen. Abbildung 5-15 zeigt eine Möglichkeit, wie sie in einer kommerziellen Auswertungssoftware der Firma Citec [Citec] realisiert wurde.

Zu der flächenhaften Darstellung (Abbildung 5-15 B) können je Flächenuntereinheit (Zellen je 0,6 m x 0,6 m) zusätzliche farbskalierte Messdaten (Abbildung 5-15 A) anderer Sensoren eingeblendet werden. Diese Visualisierung lässt beispielsweise eine verbesserte Bewertung korrosionsaktiver Bereiche durch die gleichzeitige Darstellung von Potentialfeldmessung, Betondeckung und Feuchtegehalt zu.

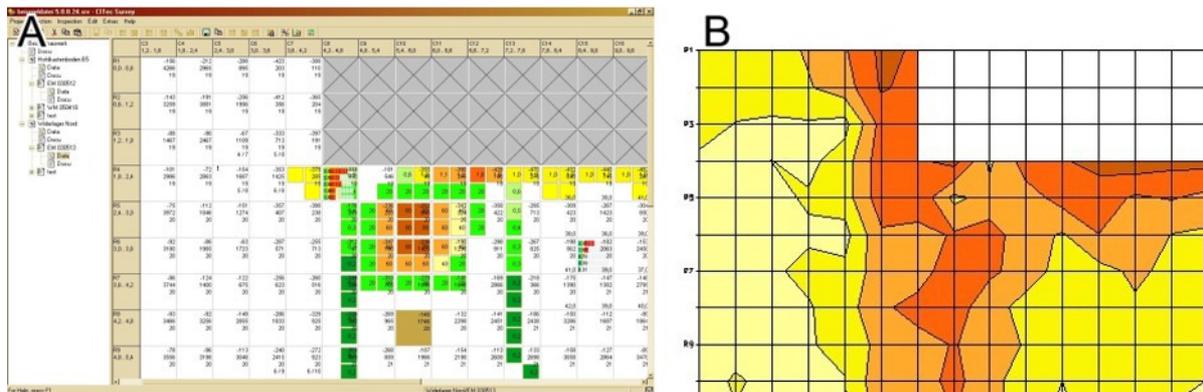


Abbildung 5-15 A+B: Auswertungsprogramm [Citec] mit Visualisierung mehrfacher Messdatentypen

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Verdichtungsgrad bei der Darstellung von Daten:

Am Beispiel einer Betondeckungsmessung sind Darstellungen der gleichen Messung mit unterschiedlichem Detail- bzw. Verdichtungsgrad aufgezeigt (Abbildung 5-16). Um Bereiche mit zu geringer Betondeckung in großen Flächen hervorheben zu können, bietet es sich an, die Darstellung durch Ermittlung des kleinsten Betondeckungswertes in Zellen (Abbildung 5-16 B und C) abzubilden und durch Schwellwerte zu kategorisieren. Der Vergleich mit den Abbildungen höheren Detailgrades bei gleicher Auflösung zeigt, dass etliche Bereiche mit zu geringer Betondeckung nur in dieser Darstellung identifiziert werden können.

Ein zu hoher Detailgrad führt dazu, dass in einer Gesamtdarstellung einer Großfläche Anzeigen übersehen werden können. Eine Möglichkeit ist es, die Bereiche jeweils vergrößert zu betrachten.

Um jedoch in einer Gesamtübersicht eine Identifikation der Bereiche mit zu geringer Betondeckung zu ermöglichen, ist eine angepasste Verdichtung auf Zellen geeigneter Größe (in diesem Fall gemäß Abbildung 5-16 B) zu verdichten. Eine zu grob gewählte Zellengröße (Abbildung 5-16 C) erlaubt keine genaue räumliche Zuordnung.

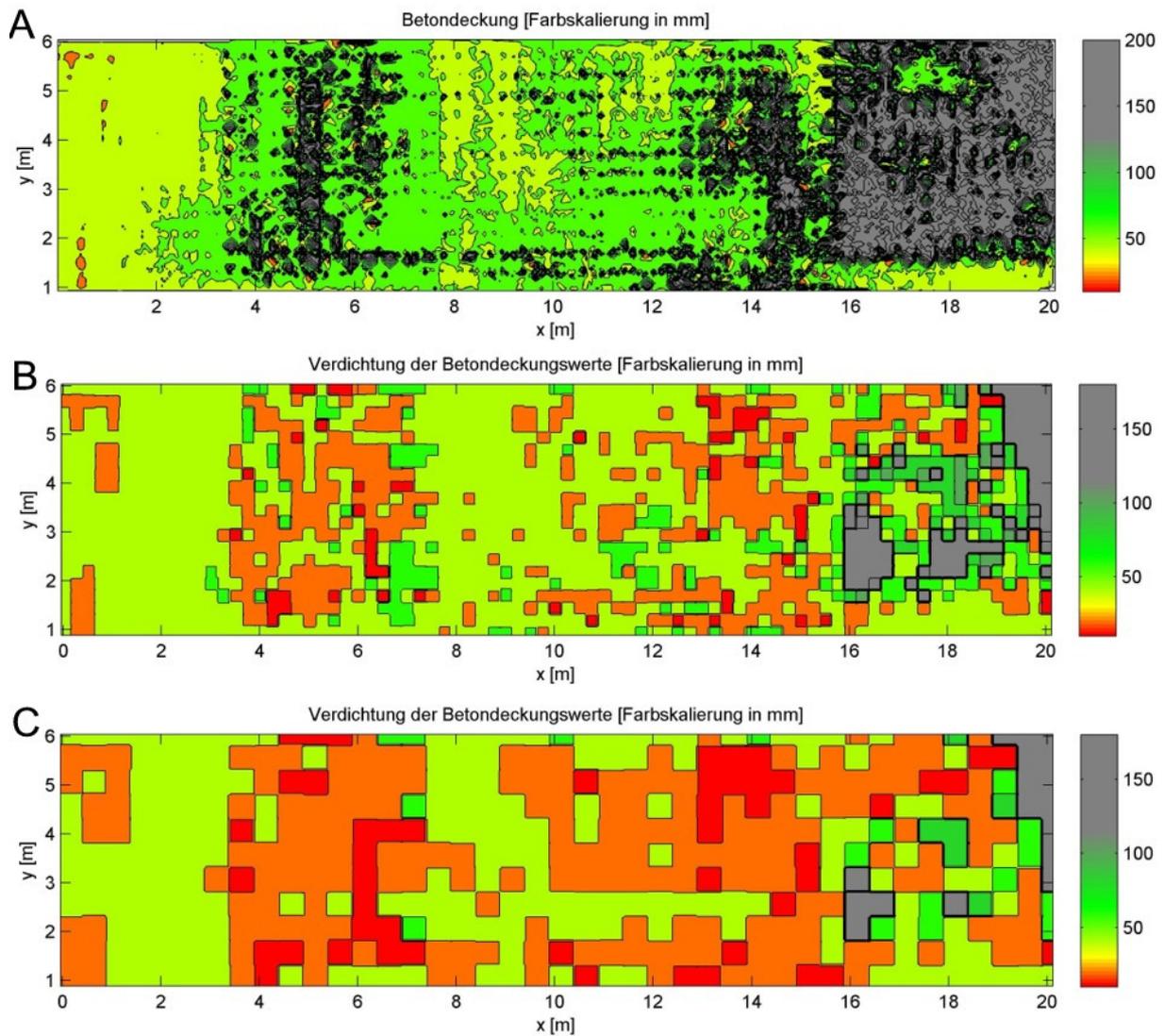


Abbildung 5-16 Flächige Darstellung einer Betondeckungsmessung mit unterschiedlichem Detailgrad, A: Rohdaten,  
 B: Verdichtung der Rohdaten auf das lokale Minimum in Zellen mit 0,25 m x 0,25 m Ausdehnung,  
 C: Verdichtung der Rohdaten auf das lokale Minimum in Zellen mit 0,5 m x 0,5 m Ausdehnung

Es zeigt sich, dass auch in der entwickelten Visualisierung, also dem letzten Schritt der Messdatenaufbereitung, eine Erhöhung der Aussagesicherheit durch eine geeignete Strategie der Auswertung erreicht werden kann.



# 6

## Diskussion der erzielten Ergebnisse und Folgerungen

### 6.1 DP-Messung

Die Form der sich durch eine aktive Korrosionsstelle ausbildenden Potentialtrichter ist abhängig von der Betondeckung und den aktuellen Materialparametern des umgebenden Betons. Je kleiner eine Anode ist und je tiefer sie liegt, umso schwieriger ist sie detektierbar [Büchler2007]. Dies gilt zum einen weil die Potentialwerte dann sehr klein sind, zum anderen weil der Potentialtrichter durch ein zu grobes Messraster übersehen werden könnte [Steck2006]. Beiden Effekten wirkt die DP-Messung im Gegensatz zur Potentialfeldmessung entgegen.

Bei der Auswertung einer flächigen Gradientenverteilung ermöglicht die Gradientensignatur durch den signifikanten Signalverlauf die sicherere Detektierbarkeit einer aktiven Anode. Insbesondere können Fehlinterpretationen dadurch vermieden werden, dass der Elektrodenabstand in der Gradientensignatur verifiziert werden kann (vgl. Abbildung 5-14), um auf die Lage des Potentialtrichters zu schließen. Darüber hinaus ist die Wahrscheinlichkeit eine Anode bei gleichem Messraster zu übersehen etwa sechsmal geringer. Dies liegt daran, dass die Messbereiche tatsächlich physikalisch mit beiden Elektrodenrädern abgetastet werden (vgl. Abbildung 3-14). Die mathematische Gradientenbildung aus Potentialwerten ist in diesem Zusammenhang mit einer Unterabtastung vergleichbar, die unter Umständen nicht den wahren Gradientenverlauf in den Zwischenräumen zwischen den Messpunkten wiedergibt.

Die Betrachtung des Makroelements (vgl. Kapitel 3.2.1) zeigt, dass die Bewertung eines Potentialtrichters nach dessen absolutem Potentialwert im lokalen Minimum nicht sinnvoll ist. Dieser Wert hängt von zu vielen unbekanntem Parametern wie der Betondeckung, der Betonfeuchte, dem Chloridgehalt und nicht zuletzt vom gesuchten Korrosionsstrom ab.

Der ursprünglich als Lösungsweg favorisierte rechnerische Ansatz der Integration der Differenzpotentialwerte (vgl. Kapitel 3.2.3) zur Rückführung auf absolute Potentialwerte kann somit nur als Nachweis der Funktionsfähigkeit der DP-Messung dienen. Eine Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit und der Aussagesicherheit über das Auftreten von Korrosionsaktivität ergibt sich daraus nicht.

Der Gradient der Differenzpotentialwerte (vgl. Kapitel 3.2.4) hingegen ist deutlich weniger abhängig von den oben genannten Parametern. Dies wird anhand der im Rahmen dieser Arbeit neu definierten sogenannten Gradientenbreite anschaulich gezeigt. Die Berechnungen

bei Variation der Betondeckung zeigen, dass sich dieser Wert nur geringfügig ändert. Durch das Gradientenkriterium (Absolutwert größer  $200 \text{ mV/m}$ ) ist eine Fehlinterpretation, die durch flächenhafte, gleichmäßig niedrige Potentiale entstehen kann, vermeidbar.

Zudem ist die Detektionswahrscheinlichkeit zum Auffinden eines Potentialtrichters anhand der Gradientensignatur bei geeigneter Anordnung der Elektroden im Verhältnis zum Messspurabstand (vgl. Kapitel 3.2.5) etwa sechsmal höher als bei einer Potentialfeldmessung mit gleichem Messspurabstand.

Abbildung 5-4 stellt die genannten Zusammenhänge deutlich dar. Die absoluten Potentiale (Abbildung 5-4 A) können zwar durch Integration aus der DP-Messung (Abbildung 5-4 B) rekonstruiert werden (Abbildung 5-4 C). Es ist somit auch ohne permanenten Bewehrungsanschluss möglich, eine Potentialfeldmessung durchzuführen. Dies ist für die Durchführung einer Messung zwar sehr praktikabel, ein erhöhter oder verbesserter Informationsgewinn wird dadurch aber nicht erzielt. Erst die Bewertung des Gradienten der Messwerte (Abbildung 5-4 D) führt zu einer sichereren und genaueren Aussage über die Korrosionswahrscheinlichkeit der Bewehrung.

Das grundlegende Ziel, eine Potentialfeldmessung ohne Bewehrungsanschluss durchführen zu können, konnte demnach realisiert werden. Darüber hinaus wurde die Aussagesicherheit über das tatsächliche Vorhandensein von korrosionsaktiven Bereichen durch die neue Methode nicht nur verbessert, sondern es konnte auch die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht werden.

## 6.2 Automatisierung

Die Anordnung von Messsensoren eines Multisensorsystems bei einer mäanderförmigen Abtastung einer Oberfläche birgt viele Schwierigkeiten. Es sind Messspurabstände, Sensorabstände und gerätespezifische Eigenheiten und die erforderliche Dichte des Messrasters zur zuverlässigen Lösung der Prüfaufgabe zu berücksichtigen.

Selbst berührungslos arbeitende Sensoren sind nicht von vornherein für eine Automatisierung geeignet. Randbedingungen wie maximale Fahrgeschwindigkeiten oder maximale Abstände von Sensorköpfen zur Messoberfläche müssen bei der Automatisierung eines Verfahrens mehr Beachtung geschenkt werden, als dies bei Handmessungen notwendig ist.

Die Flächenleistung ist nicht nur allein von der Fahrgeschwindigkeit und dem Messspurabstand abhängig. Jede zeitliche Verzögerung von wenigen Sekunden je Fahrspur bedeutet bei der Untersuchung großer Flächen einen zeitlichen Mehraufwand von etlichen Minuten bis hin zu Stunden. Für jede Komponente sollte (am besten vorab durch Simulation, siehe im Anhang Kapitel 9.6) ein zeitliches Optimum erreicht werden, um eine niedrige Gesamtmesszeit zu erzielen. Sensoren mit Datenraten von weniger als  $10 \text{ Hz}$  ( $\Delta t = 100 \text{ ms}$ )

eignen sich nur, wenn keine Auflösungen (Messpunktabstände) in Fahrtrichtung im Zentimeterbereich gefordert sind.

Die Verfahrenskombination mit der Aufnahme von Sensordaten in einer hohen Messpunktdichte ermöglicht eine deutliche Steigerung der Zuverlässigkeit und Aussagesicherheit von Verfahren und erzeugt damit für den Anwender einen qualitativen Mehrwert seiner Prüfaussage. Eine Verfahrenskombination zwischen unterschiedlichen Verfahren, die auf die gleiche Messgröße abzielen, ist dann sinnvoll, wenn Messwerte sehr zuverlässig und eindeutig bestimmt werden müssen. Wird mit zwei Verfahren, die sich auf unterschiedliche physikalische Effekte stützen, das Ergebnis gleich bewertet, kann von einer verbesserten Aussagesicherheit ausgegangen werden.

Der durch eine Automatisierung erzielte Mehrwert im Hinblick auf die Aussagesicherheit von flächendeckenden Messungen mit hoher Punktdichte, kann nur dadurch erreicht werden, dass zusätzliche systematische Messabweichungen vermieden werden.

Der Vergleich mit Handmessungen (vgl. Kapitel 4.5) zeigt nicht nur einen zeitlichen Vorteil der automatisierten Anwendung, auch die Aussagesicherheit einzelner Verfahren kann durch die parallele gleichzeitige Erfassung und Kombination von Messergebnissen verbessert werden, denn die Messungen erfolgen ohne Zeitversatz am gleichen Ort.

Voraussetzung für eine flächige Datenaufnahme ist die in Kapitel 4.1 beschriebene Methodik, mit der eine Messfläche mit mehreren Sensoren, die ggf. nicht auf der Fahrachse positioniert werden können, anwendungsgerecht abgetastet werden kann.

Die großflächig angewendete Verfahrenskombination aus Messung der Betondeckung und der Bauteilfeuchte ermöglicht es, wichtige Zusatzinformationen für die DP-Messung zu bestimmen. Bei dieser Vorgehensweise wird sowohl die Aussagesicherheit deutlich verbessert, als auch die Gesamtmessdauer durch parallele Messungen reduziert.

In jedem Fall kann durch geschickte Verfahrenskombination ein signifikant besseres Ergebnis gegenüber Einzelmessungen erzielt werden, was sowohl die Effizienz der Messung als auch die Verlässlichkeit und Aussagesicherheit der Messwerte betrifft.

Im Vergleich zu Systemen, die nur **zeilig** aufgenommene Daten in der Orientierung der Fortbewegungsrichtung aneinanderfügen, und zu solchen, die nur über **ein** flächig messendes Verfahren verfügen, ist die **Kombination flächiger, multisensorisch** ausgerichteter Messwerterfassungssysteme eine entscheidende Neuerung.

### 6.3 Praktische Anwendung

Mit der DP-Messung ist eine Methodik entwickelt worden, mit der ohne Bewehrungsanschluss schnell und zuverlässig Bereiche mit hoher Wahrscheinlichkeit für Korrosionsaktivität eingegrenzt werden können.

Die Möglichkeit zur automatisierten, großflächigen Abtastung mit ständig aktuellen Positionsdaten eines Sensors ermöglicht es, Verfahren und Verfahrenskombinationen vollflächig anzuwenden, die bislang aufgrund des manuellen Aufwands und des zu erwartenden großen Datenvolumens nicht eingesetzt wurden.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die genaue Kenntnis der jederzeit aktuellen Pose der verwendeten Sensoren für eine wirtschaftliche, großflächige Untersuchung von großen Flächen eine unverzichtbare Voraussetzung ist.

Die Kombination mit gleichzeitig eingesetzten Verfahren wie die Ermittlung der Betondeckung und Bauteilfeuchte ermöglicht es, die Aussagesicherheit der DP-Messung zu erhöhen. Zum einen dient die Messung der Bauteilfeuchte als Selbstkontrolle der richtigen Befeuchtung der Messoberfläche während der DP-Messung. Werden Feuchtemessungen vor einer Befeuchtung durchgeführt dienen die Messergebnisse der Bewertung, inwieweit daraus ggf. auf einen passiven Zustand der Bewehrung geschlossen werden kann (vgl. Kapitel 3.1). Zum anderen kann durch die flächendeckende Ermittlung der Betondeckung und der Bewehrungslage die Wahrscheinlichkeit tatsächlich vorhandener Korrosion plausibilisiert werden. Fehlinterpretationen der tatsächlichen Betondeckung können vermieden werden, wenn die Betondeckung in der Nähe, aber außerhalb eines korrosionsaktiven Bereiches mit in Betracht gezogen wird. Das Zentrum aktiver Korrosionsherde darf nur oberhalb eines Bewehrungsstabes und nicht beispielsweise in den Maschen einer Bewehrung lokalisiert werden, in denen sich gar kein Stahl befindet.

In der Praxis werden mit der Potentialfeldmessung meist mehrere Hundert Quadratmeter, meist ganze Brückenflächen oder Parkdecks, halbautomatisch untersucht. Die Detektion von Potentialtrichtern mit einer Ausdehnung im Dezimeterbereich kann nur durch enge Messraster (Messspurabstand 15-30 cm) sicher gewährleistet werden. Der Zeitaufwand und die damit verbundenen Kosten können durch eine vollständige Automatisierung weiter drastisch verringert werden.

Im Anhang (Kapitel 9.5) wird aufgezeigt, welche Modifikationen an Standardmessgeräten durchzuführen und welche zusätzlichen Messabweichungen zu beachten sind, um großflächig automatisiert messen zu können.

In dem nachfolgenden Ausblick (Kapitel 7.2) wird erläutert, wie sich weitere Messmethoden in das vorhandene Messsystem integrieren lassen. Für viele Fragestellungen ist jedoch noch ein erheblicher Forschungsaufwand zu leisten, da zum Teil keine entsprechenden zerstörungsfreien Verfahren existieren.

Die DP-Messung lässt sich natürlich auch manuell durchführen. Von großem Interesse sind vor allem der untere Bereich von Stützen („Stützenfüße“), der durch nicht ausreichende Wandanschlüsse oft hohe Chloridkonzentrationen aufweisen kann. Hier werden durch das kapillare Saugen des Betons Chloride in wässriger Lösung vom Bodenbereich aufgenommen und führen ebenfalls zur Korrosionsschäden.

## 6.4 Vergleich zwischen Theorie und Anwendung

In Kapitel 3.2.1 wurden mit Hilfe der Betrachtung des Makroelements die zu erwartenden Messwerte einer DP-Messung simuliert. Diese theoretischen Annahmen zur Funktionsweise der DP-Messung konnten sowohl im Labormaßstab (vgl. Kapitel 3.3) als auch im praktischen Einsatz (vgl. Kapitel 5) nachgewiesen werden. Auch die Forschungsergebnisse aus [Büchler2007] und die praktischen Vorversuche zur Verwendung einer Differenzanordnung ohne Bewehrungsanschluss, wie sie in Abschnitt 3.1 erläutert wurden, konnten im Experiment und im Feldversuch nachvollzogen werden.

Durch die Rückrechnung (Integration) der an Probekörpern gemessenen Differenzpotentialwerte auf Potentialwerte und anschließendem Vergleich mit gemessenen Potentialwerten, konnte eine Übereinstimmung zu den mathematischen Vorbetrachtungen (vgl. Kapitel 3.2.3) festgestellt werden.

Abbildung 6-1 zeigt nochmals die am GBP aufgefundene aktive Korrosionsstelle (vgl. Abbildung 5-4 D) in der räumlichen Darstellungsform der Abbildung 3-9 B.

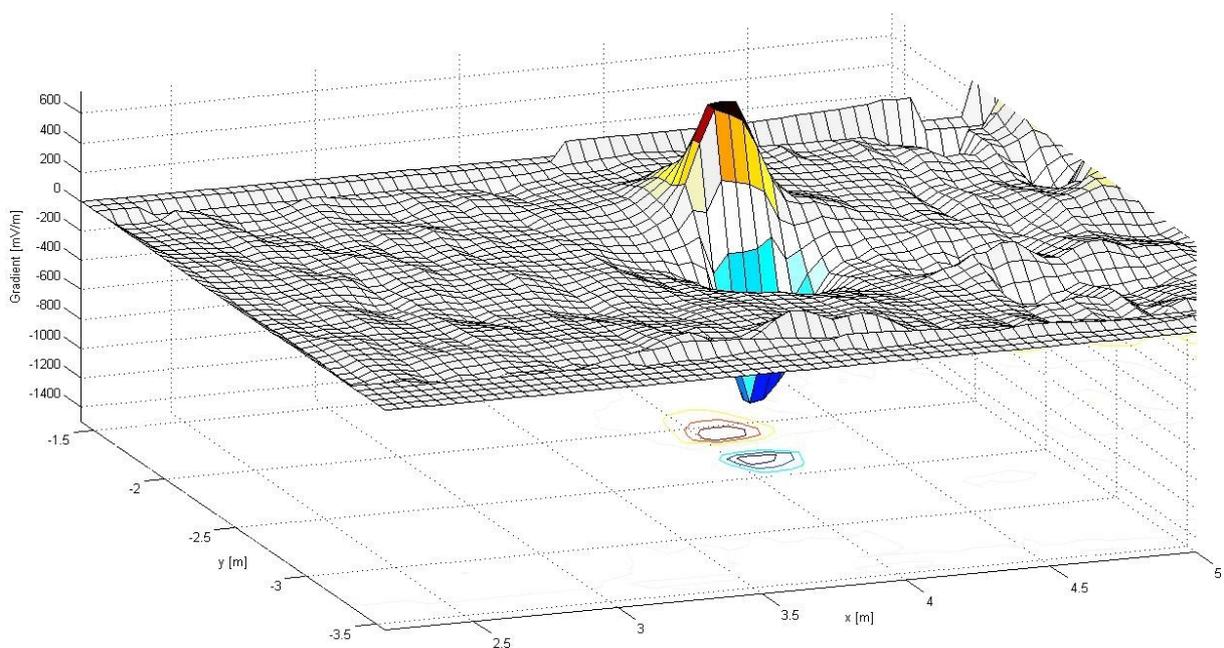


Abbildung 6-1 Darstellung der Gradientenverteilung der Messung am GBP (gemäß Abbildung 5-4 D) in der Darstellungsform der Abbildung 3-9 B

Eine Gradientenverteilung kann sowohl aus Potentialwerten berechnet als auch durch direkte DP-Messung durch Skalierung der Messwerte erzeugt werden.

Der Gradient ist das höherwertige Bewertungskriterium zur Lokalisierung möglicher korrosionsaktiver Bereiche. Der absolute Grenzwert von 200 mV/m hat sich als praxistauglich herausgestellt. Die direkte Messung des Gradienten erhöht zudem die Detektionswahrscheinlichkeit und Aussagesicherheit des Verfahrens (vgl. Kapitel 6.1).

Es konnte gezeigt werden, dass das neu entwickelte Verfahren auf der Basis eines in der Praxis wenig genutzten oder in Vergessenheit geratenen Messprinzips (vgl. Kapitel 3.1.1)

durch die automatisierte, ortsreferenzierte Messwerterfassung für die Lokalisierung von korrosionsaktiven Bereichen erfolgreich eingesetzt werden kann.

Der Vorteil, eine Lokalisierung ohne Bewehrungsanschluss frei über große Flächen durchführen zu können, führt zu einer enormen Zeitersparnis. Um das Verfahren in die praktische Anwendung zu überführen sind weitere Untersuchungen an Bauwerken notwendig und auch im Rahmen von Projekten an der BAM geplant (siehe Kapitel 7.2.1 (Ausblick)).

Bei den Messungen der Betondeckung in einem dichten Messraster direkt über einem korrosionsaktiven Bereich wurde festgestellt, dass die Betondeckungswerte offenbar nicht korrekt ermittelt werden können. Es wird vermutet, dass die Abweichungen entstehen, da sich entweder in einer Eisenoxidschicht auf dem Bewehrungsstahl keine Wirbelströme ausbilden, oder dass der Bewehrungsstahl bereits durch Lochfraß erheblich geschädigt ist. Demzufolge sollte eine Betondeckungsmessung immer mit Messwerten in der Nähe, aber außerhalb eines korrosionsaktiven Bereiches verglichen werden. Hier wird wieder einer der Vorteile einer kontinuierlichen automatisierten Messung deutlich.

Die DP-Messung ist wie die Potentialfeldmessung nur für die Detektion chloridinduzierter Korrosion von Stahl in Beton geeignet. Andere Korrosionsformen führen nicht zu einer Makroelementbildung, die die Ausbildung der typischen Potentialtrichter im den Stahl umgebenden Beton hervorruft und auf denen das Messprinzip fußt.

Neben Bewehrung können auch andere metallische Objekte wie Hüllrohre oder Ankerelemente von Korrosion betroffen sein. Inwieweit deren Korrosion detektiert werden kann hängt sehr stark von der jeweiligen Einbautiefe ab (vgl. Kapitel 3.2.1).

Sowohl für die DP-Messung als auch für die klassische Potentialfeldmessung ist es essentiell, eventuell vorhandene nichtleitende Beschichtungen zu entfernen. Ebenso können die Messungen bei der Untersuchung von Brückendecks nur durchgeführt werden, wenn keine Asphaltsschichten und Abdichtungen mehr vorhanden sind.

## 6.5 Empfehlungen für eine Messstrategie

Dieses Kapitel widmet sich der Darstellung einer systematischen Herangehensweise, die die sinnvolle Anwendung der DP-Messung in Kombination mit anderen Verfahren aufzeigt. Bei der Reihenfolge der Untersuchungen wurde speziell auf deren Abhängigkeiten geachtet.

Visuelle Aufnahme	Eine visuelle Aufnahme der zu untersuchenden Oberflächen sollte jeder Untersuchung vorausgehen. Verdeckte Schäden werden damit meist nicht erkannt, jedoch weisen sichtbare Schäden wie Risse, Abplatzungen oder Rostfahnen bereits auf mögliche Schäden hin. Erkennbar unterschiedliche Bereiche mit bereits reparierten Flächen müssen zur Vermeidung von Fehlinterpretationen kartiert werden, da die verwendeten Reparaturmörtel meist andere Materialeigenschaften aufweisen als das Ursprungsmaterial.
Bestimmung der Bauteilfeuchte	Eine Verwendung des Mikrowellenverfahrens zur Bestimmung der Bauteilfeuchte muss <b>vor</b> dem Einsatz der DP-Messung erfolgen, da die notwendige Vorwässerung der Oberflächen das eigentliche Messergebnis verfälschen würde.
DP-Messung: Vorbereitungen	Nichtleitende Beschichtungen sind vorab zu entfernen. Eine ausreichende Vorwässerung muss so erfolgen, dass keine Austrocknung der Oberflächen während der Messung zu erwarten ist. Bei großen Flächen muss der Vorgang ggf. wiederholt werden.
DP-Messung: Festlegung des Messrasters	Die Anordnung der Radelektroden und die Festlegung des Messspurabstands sind gemäß den Ausführungen in den Kapiteln 3.2.5 und 3.2.6 zu wählen. Ein Messspurabstand der genau dem doppelten Elektrodenabstand entspricht, maximiert die Detektionswahrscheinlichkeit für das Auffinden eines korrosionsaktiven Bereiches. Kleine Messspurabstände im Bereich von 25 cm sind sinnvoll, wenn eine hohe Detektionswahrscheinlichkeit gefordert ist, vermindern aber die Flächenleistung je Stunde.
DP-Messung: Durchführung	Die Messungen sind zügig aber gleichmäßig durchzuführen, um möglichst gleichmäßige Bedingungen während der gesamten Messdauer zu gewährleisten. Während der Messung ist auf eine ausreichende Befeuchtung der Elektrodenräder zu achten.

DP-Messung: Begleitende Messungen	Mit dem automatisierten System „BetoScan“ besteht die Möglichkeit, Betondeckungsmessungen und die Messung der Bauteilfeuchte simultan zur DP-Messung durchzuführen. In diesem Fall dient die Messung der Bauteilfeuchte als qualitätssichernde Maßnahme der Messung, die gewährleistet, dass eine ausreichende Befeuchtung der Oberfläche während der gesamten Messzeit eingehalten wurde.
DP-Messung: Auswertung	Bei der Auswertung der Messdaten muss auf die Polarisation der Ausrichtung des Messelektrodenpaars geachtet werden. Bei einem mäanderförmigen Spurverlauf ist das Vorzeichen der Messwerte jeder zweiten Messspur umzukehren. Die Auswertung sollte vor Ort erfolgen, um zeitnah festlegen zu können, in welchen Bereichen ergänzende zerstörende Untersuchungen sinnvoll sind.
Bestimmung der Betondeckung	Ist eine flächendeckende, automatisierte Bestimmung der Betondeckung nicht möglich, so sollte eine repräsentative Anzahl von Betondeckungswerten in- und außerhalb von korrosionsaktiven Bereichen manuell ermittelt werden. Hier ist darauf zu achten, dass im Bereich bereits stark korrodierter Bewehrungsstähle unter Umständen Falschanzeigen auftreten können (vgl. hierzu Kapitel 5.1.2). Durch Anbohren oder an anderen Öffnungsstellen können die Messergebnisse kalibriert werden.
Entnahme von Bohrkernen zur Chloridanalyse	Die klassische Methode zur tiefenabhängigen Bestimmung der Chloridverteilung ist die stufenweise Entnahme von Bohrmehlproben zur nasschemischen Analyse. Weitaus einfacher und mit höherer Auflösung können mit dem LIBS-Verfahren [Wilsch2008] Chloridprofile aus gespaltenen Bohrkernen aufgenommen werden. Vorzugsweise sollten Bohrkern dort entnommen werden, wo bereits Verdachtsstellen durch die anderen Verfahren (geringe Betondeckung, hohe Bauteilfeuchte, hoher Potentialgradient) angezeigt werden.
Ergänzende zerstörende Untersuchungen	Die Ermittlung der Karbonatisierungstiefe erfolgt an frischen Bruchstellen mit einer Indikatorlösung (Phenolphthalein). Eine stichprobenartige Messung an wenigen exemplarischen Stellen ist ausreichend.
Abschließende Verifikation	Letztendlich ist es immer angeraten, Bereiche mit Verdacht auf aktive Korrosion durch Freilegung der Bewehrung zu verifizieren.

# 7

## Schlussbetrachtung

### 7.1 Zusammenfassung

#### DP-Messung

Die Potentialfeldmessung ist eines der wichtigsten zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen. In der Praxis werden mit der Potentialfeldmessung mehrere Hundert Quadratmeter (ganze Brückenflächen oder Parkdecks), halbautomatisch bzw. manuell untersucht.

Mit dieser Methode kann eine ortsabhängige Wahrscheinlichkeit für aktive, chloridinduzierte Bewehrungskorrosion bestimmt werden. Die Interpretation der Messergebnisse ist jedoch oft nicht eindeutig. Bei der konventionellen Anwendung muss über ein langes Schleppkabel eine Verbindung zwischen einem freigelegten Stück der Bewehrung mit dem Messgerät hergestellt werden. Das zerstörungsarme Kontaktieren der Bewehrung muss sequentiell für jeden durch Trennfugen abgeteilten Messabschnitt wiederholt werden, wodurch sich der Zeitaufwand und die damit verbundenen Kosten erhöhen. Die Anfälligkeit für fehlerhaftes Messen steigt.

Der Zeitaufwand für die Messungen kann durch eine vollständige Automatisierung drastisch verringert werden, jedoch ist die Voraussetzung hierfür, während der Messung auf die Kabelverbindung verzichten zu können. Die zu diesem Zweck entwickelte und hier erstmals beschriebene Differenzpotentialfeldmessung ist zusätzlich dazu im Vergleich zur Potentialfeldmessung ein vollkommen zerstörungsfreies Messverfahren.

Der Gradient des Potentials ist als Bewertungskriterium besser geeignet als das absolute Potential im lokalen Minimum eines Potentialtrichters, weshalb die ortsreferenzierte Bestimmung der Gradienten der Messspannungen die verlässlichere Methode der Bewertung des Korrosionspotentials darstellt. Nur aufgrund der Potentialwerte ist eine eindeutige Zuordnung korrosionsaktiver Bewehrungszustände nicht möglich. Die Gradienten können zwar sowohl durch Berechnung aus Potentialwerten als auch durch eine direkte DP-Messung und anschließende Skalierung der Messwerte erzeugt werden. Mit der direkten Messung des Gradienten kann aber die Detektionswahrscheinlichkeit eines Potentialtrichters um ein Vielfaches erhöht werden (vgl. Kapitel 3.2.5).

Anhand eines Entscheidungsbaums ([Steck2006], vgl. Abbildung 3-3) wurde gezeigt, dass (berechnete) Gradienten sowohl bei unkritischen wie bei kritischen Potentialwerten das höherwertige Kriterium zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für aktive Korrosion darstellen, da sie in beiden Fällen eine Auf- oder Abwertung der hier definierten Zustandsnote (vgl. Tabelle 2) innerhalb des Gesamtergebnisses aller angewendeten Prüfverfahren (zerstörungsfrei und konventionell) bewirken können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die zerstörungsarme Potentialfeldmessung zu einem zerstörungsfreien Differenzpotentialfeldmessverfahren (DP-Messung) verbessert, das sich auch vollständig automatisiert anwenden lässt.

Da für die Erhöhung der Aussagesicherheit der Potentialfeldmessung weitere Informationen über die jeweilige Betondeckung, den Feuchtegehalt und den elektrolytischen Betonwiderstand am jeweiligen Messort zur Vermeidung von Fehlinterpretationen notwendig sind, wurde eine Messmethodik entwickelt, um mehrere Verfahren gleichzeitig am nahezu selben Ort durchführen zu können.

In der Arbeit werden die Entwicklungsschritte hin zu einem Multisensoriksystem zusammengefasst. Ebenso werden die Bewertungskriterien für die DP-Messung definiert.

In Bezug zu dem aus der Literatur [Lay2003] bekannten Grenzwert des Gradienten von 200 mV / m wurde die sogenannte Gradientenbreite eines Potentialtrichters definiert. Anhand der Gradientensignatur (vgl. Kapitel 3.2.5) kann ein korrosionsaktiver Bereich eindeutig anhand des Elektrodenabstands identifiziert werden.

### **Automatisierung**

Durch die Automatisierung mit der DP-Messung sind aussagesichere und zugleich schnellere Messungen großer Flächen möglich. Die hochaufgelöste und positionsgenaue Datenerfassung mehrerer Sensoren gleichzeitig erhöht die Aussagekraft der Testergebnisse ganz erheblich, besonders im Gegensatz zur manuellen, punktwisen Anwendungen der einzelnen Messmethoden.

Die innovative Messmethodik für ein Multisensoriksystem nutzt roboterbasierte Navigations- und Positionierungssysteme zur präzisen und zuverlässigen Messwerterfassung von im Bauwesen etablierten Prüfverfahren. Insbesondere sind für die DP-Messung Position und Orientierung (Pose) eines Messpunktes zu erfassen.

Der Nachweis, dass sich die Aussagesicherheit der eingesetzten Verfahren durch deren Kombination und eine hohe Messpunktdichte erhöht, wurde anhand von Fallbeispielen aus Bauwerksuntersuchungen und Tests an Probekörpern erbracht.

Erstmals wurde im Rahmen dieser Arbeit diese Methodik im Bauwesen für automatisierte Untersuchungen sehr großer Flächen (mehrere Hundert Quadratmeter) genutzt, wie sie bereits für ausgewählte Verfahren und kleine Flächen mit Erfolg regelmäßig angewendet wird. Im Ergebnis fällt bei der Messung von großen Flächen eine sehr hohe Anzahl an Messdaten an, die es erforderlich macht, eine neue flächenhafte, bildgebende Darstellung der Messwerte gleichzeitig eingesetzter Verfahren weiter zu entwickeln (siehe Ausblick Kapitel 7.2.2).

Die vollflächige Verfahrenskombination trägt signifikant dazu bei, alle Randbedingungen bei der Zustandsbewertung zu berücksichtigen.

Es konnte gezeigt werden, wie die automatisierte Kombination des Verfahrens mit großflächigen Messungen des Feuchtegehalts und der Betondeckung zu einer verlässlicheren Zustandsbewertung führt. Die kombinierte Anwendung mehrerer Verfahren in

dichteren Messrastern ermöglicht eine schnelle Identifikation von möglicherweise korrosionsaktiven Bereichen, ohne abschnittsweise die Bewehrung zur Ankopplung aufwendig freilegen zu müssen. Fehlmessungen aufgrund mangelhafter Ankopplung werden so vermieden. Anhand von Betondeckungsmessungen innerhalb eines korrosionsaktiven Bereiches konnte gezeigt werden, wie Fehlinterpretationen vermieden werden können (vgl. Kapitel 5.2.1).

Die kombinierte Anwendung verschiedener Verfahren wirkt sich vorteilhaft auf die Zuverlässigkeit zur Lösung von Prüfaufgaben aus. Damit Ergebnisse verschiedener Verfahren kombiniert werden können, müssen die Messdaten in einem einheitlichen Koordinatensystem auf kongruenten Flächen erfasst werden.

Jedoch müssen die einzelnen Prüfmethode zielgerichtet eingesetzt werden, um ein wirtschaftliches Instandsetzungsmanagement für Bauwerke zu erhalten. Das Prinzip der einheitlichen Schadensbewertung sollte auch dann verfolgt werden, wenn mit dem Multisensoriksystem ein effektives Werkzeug verfügbar ist.

Das bedeutet für das Gesamtbild bei der Untersuchung, dass die Zustandsnote umso schlechter wird, je mehr kritische Indizien sich bei einer Untersuchung darstellen.

### **Grenzen des Verfahrens**

Die Randbedingungen für die Durchführung einer DP-Messung ähneln der einer Potentialfeldmessung. Ganz entscheidend ist es, eine optimale, gleichbleibende Kontaktierung der Messelektroden zum Beton herstellen zu können. Isolierende Beschichtungen oder zu trockene Oberflächen verhindern oder verfälschen die Messwerte.

Auch die DP-Messung kann wie die Potentialfeldmessung nicht den Schädigungsgrad an Bewehrungsstäben infolge Korrosion zeigen, da nur die aktuelle Korrosionsaktivität angezeigt wird. Entscheidend ist aber, dass korrosionsaktive Bereiche schneller und aussagesicherer mit einer höheren Detektionswahrscheinlichkeit aufgefunden werden können.

Es wurde deutlich, dass die Verfahrenskombination mit der Messung der Betondeckung und der indirekten Bestimmung der Bauteilfeuchte über die Messung des elektrolytischen Betonwiderstands zur ganzheitlichen Betrachtung des Bauwerks eine gute Ausgangsbasis für die Bewertung von Bauschäden liefert. Letztendlich müssen jedoch in der Praxis zerstörende Prüfungen zur Chloridkonzentrationsbestimmung, die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und visuelle Kontrollen durch Freilegen der Bewehrung eine vollständige, aussagekräftige Untersuchung abrunden.

Die Grenzen für die Automatisierung liegen in den zerstörungssarmen oder zerstörenden Verfahren. Für die Ermittlung von Beschichtungsdicken von Oberflächenschutzsystemen auf Betonoberflächen ist kein zerstörungsfreies Verfahren bekannt.

## 7.2 Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Potenzial des entwickelten Verfahrens und der automatisierten Messmethodik ausführlich vorgestellt. Weitere Untersuchungen und Entwicklungen sind möglich und werden nachfolgend beschrieben.

Einerseits gibt es zahlreiche neue Fragestellungen und Möglichkeiten zur Anwendung der DP-Messung, andererseits eröffnet eine automatisierte und großflächig anwendbare Robotertechnik zur Integration von Sensoren mit kontinuierlich bereitstehenden präzisen Positionsdaten im Bauwesen vielfältige Möglichkeiten, weitere Verfahren zu automatisieren.

### 7.2.1 Weiterentwicklung der DP-Messung

Die DP-Messung wird an weiteren Bauwerken angewendet werden, um die Datenbasis auch für eine statistische Auswertung zu vergrößern. Auch wird die Weiterentwicklung des Systems dazu führen, mit zusätzlichen Radelektroden in Arrayanordnungen sowohl die Flächenleistung des Systems zu erhöhen als auch die Auswertung zu verfeinern.

Die Anwendung der DP-Messung wurde im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich für große horizontale Flächen gezeigt. In der Praxis sind aber auch insbesondere vertikale Strukturen wie Stützen(füße) und Wandanschlüsse anfällig für chloridinduzierte Korrosion, da in diesen Bereichen Feuchtigkeit und Chloride durch kapillares Saugen eingetragen werden.

Um die DP-Messung für die Anwendung zu vereinfachen ist es naheliegend, Handmessgeräte zu entwickeln, die mit zwei Elektroden in einem fixen Abstand ausgestattet sind und direkt den Gradienten als Messwert anzeigen.

In diesen Prüfbereichen werden oft hohe Feuchtegradienten beobachtet. Eine Verfahrenskombination mit der elektrolytischen Betonwiderstandsmessung oder Feuchtebestimmung mit dem Mikrowellenverfahren sollte untersucht werden, um eine Korrelation zwischen Potentialgradienten und Feuchtegradienten herzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur Kupfer/Kupfersulfat-Elektroden verwendet, da sie preiswert sind und deshalb in der Betonprüfpraxis am meisten Verbreitung finden. Auch alle Angaben zur Bewertung der Potentialfeldmessung nach absoluten Potentialen in den Normen und Merkblättern (vgl. Kapitel 2.2.1) beziehen sich meist auf diesen Elektrodentyp.

Da wie gezeigt bei der DP-Messung nur die Spannungsdifferenzen zur Bestimmung des Gradienten verwendet werden, ist auch die Untersuchung von Silber/Silberchlorid-Elektroden oder Kalomel-Elektroden hinsichtlich Ihrer Anwendbarkeit für die DP-Messung interessant. Im Vergleich zur Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode sind bei diesen Elektrodentypen geringere Temperaturabhängigkeiten und höhere Langzeitstabilitäten zu erwarten.

Hierbei muss der Wert von 200 mV/m als Kriterium der Gradientenbreite verifiziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine Korrelation in Bezug auf eine gleichzeitig mögliche karbonatisierungsinduzierte Korrosion der Bewehrung und den damit verbundenen

Mischeffekten zur chloridinduzierten Korrosion hergestellt. Untersuchungen hierzu werden die Aussagesicherheit des Verfahrens weiter verbessern.

Die Definition von Zustandsnoten (vgl. Kapitel 3.1) beziehen sich meist auf ein Bauwerk als Ganzes. Ideal wäre es, die Auswertung soweit zu verfeinern, dass Zustandsnoten gesondert für einzelne Prüfbereiche angegeben werden können, um eine mehr bedarfsgerechte Instandsetzung planen zu können.

### 7.2.2 Vorschläge für die weitere Automatisierung von Prüfverfahren

- Für die Qualitätssicherung bei der Herstellung von Oberflächenschutzsystemen ist die Oberflächenrauheit ein charakterisierender Parameter, für dessen Erfassung bislang keine großflächige bzw. automatisierte Anwendung bekannt ist. Denkbar wäre die Entwicklung eines Streulichtverfahrens, bei dem mit Zeilenkameras Oberflächen großflächig gescannt und bewertet werden könnten.
- Für die Messung von Beschichtungsdicken von Oberflächenschutzsystemen ist keine zerstörungsfreie Prüftechnik bekannt (siehe Anhang Abschnitt 9.4.1). Ein erster Ansatz wird in [Garbacz2003] mit der Anwendung von Luftultraschall verfolgt. Dieses Verfahren könnte eine großflächige Ermittlung von Beschichtungsdicken im Rahmen einer Qualitätssicherung zerstörungsfrei und flächendeckend ermöglichen. Auch eine Analyse des Verschleißzustandes einer Beschichtung im Rahmen einer Bestandserfassung ist denkbar.
- Aktive Impulsthermographie [Maierhofer2004] zur Detektion von Ablösungen könnte automatisiert werden, indem an einem Robotersystem stirnseitig eine Wärmequelle oder eine energiereiche Blitzquelle als Erwärmungseinheit integriert wird. Die Messung des Abkühlungsverhaltens müsste mit Zeilenkameras örtlich bzw. zeitlich versetzt aufgenommen werden.
- Zur flächendeckenden Ermittlung der Betonfestigkeit könnte die Automatisierung eines Rückprallhammers realisiert werden.
- Für die galvanostatische Pulsmessung (siehe Kapitel 3.1.2) ist keine automatisierte Anwendung bekannt. Eine Modifikation des Messkopfes und die Anpassung des Verfahrens wären zur automatisierten Anwendung notwendig.
- Die Automatisierung der elektrolytischen Betonwiderstandsmessung (vgl. Kapitel 2.2.4) wird im Zuge von Nachfolgeprojekten des BetoScan-Projekts weiter verfolgt.
- Mit dem MIRA System [Acsys] (siehe auch Kapitel 9.2.3 im Anhang) ist ein Sampling-Phased-Arraysystem mit Punktkontaktprüfköpfen auf den Markt gekommen. Dieses ermöglicht eine direkte Auswertung des unter dem Gerät befindlichen Querschnitts.

Denkbar wäre eine automatische Verfolgung eines Spannkanals durch Rückkopplung der ermittelten Objektposition an die Navigationsschnittstelle des Roboters während einer Messung.

Grundsätzlich ist in der bildgebenden Darstellung von flächenhaft aufgenommenen Messwerten unterschiedlicher Verfahren noch Entwicklungspotential. Ziel muss es sein, dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, verdächtige Anzeigen visuell eindeutig zu erfassen.

Auch weitere Modifikationen in der Anwendung von Verfahren und die Ausrichtung auf andere Bauwerke bieten ein breites Entwicklungspotenzial:

- Durch den mehrfachen Einsatz **gleichartiger** Sensoren in Array-Anordnungen kann die Messzeit verkürzt bzw. die Flächenleistung erhöht werden.
- Ein wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit, Wiederholungsmessungen nach längeren Zeiträumen deckungsgleich zu bereits ausgeführten Prüfungen durchzuführen. Im Sinne eines Monitoring in Intervallen kann ein automatisiertes System als Werkzeug für ein Lebensdauermanagement verwendet werden, um eine initiale Zustandserfassung durchzuführen und das Fortschreiten von Schäden zu charakterisieren [Boller2009]. Durch die digitale Kartografierung der untersuchten Flächen ist die Deckungsgleichheit einfach herzustellen, da keine Abweichungen in den Positionszuordnungen zu erwarten sind, wie sie durch ein erneutes Konstruieren von Hilfslinien auftreten können.
- In [Wieland2010] wird ein Inspektionsfahrzeug zum Rissmonitoring bei der Untersuchung von Fahrbahndeckungen aus Beton eingesetzt. Die hier verwendete Kamertechnik in Kombination mit der Positionsbestimmung per GPS müsste für die Untersuchung von Betonoberflächen in geschlossenen Bauwerken an die vorhandene Laserpositionsbestimmung angepasst werden.
- Auch in anderen Bauwerken mit horizontalen Großflächen wie Brücken, Fahrbahnen oder Industriehallen finden sich ähnliche Fragestellungen zur Zustandsbewertung wie in Parkhäusern. Neben Stahlbeton ist auch die Untersuchung von Asphalt oder anderen Deckschichten von Interesse

## 7.3 Epilog

Die Vielzahl von hier vorgestellten Messverfahren, mit denen Schäden an Bauteilen aus Stahlbeton beschrieben und bewertet werden, darf nicht den Eindruck erwecken, Stahlbeton wäre ein „schlechter“ Werkstoff. Das Gegenteil ist der Fall: Stahlbeton ist ein viel genutzter, zuverlässiger, äußert stabiler, relativ leicht herstellbarer und beliebig formbarer Verbundwerkstoff, der für nahezu jeden Einsatzbereich im Bauwesen angepasst werden kann.

Entscheidend sind aber wie bei jedem Werkstoff die richtige Auswahl und Zusammensetzung der Materialien, die fachgemäße Dimensionierung aller Einbauten gemäß den Anforderungen, der ordnungsgemäße fehlerfreie Herstellungsprozess und ein adäquater Schutz des fertigen Bauteils gegen externe Einflüsse.

Dieser Idealfall entspricht natürlich nicht immer den realen Gegebenheiten. Eingebaute Fehler und falsche Dimensionierungen, aber auch Änderungen und Verlängerungen der Nutzung beispielsweise durch erhöhte Lasten, Umgebungseinflüsse, verstärkte Nutzung von Tausalzen und auch die Alterung eines Bauteils verändern den ursprünglich angestrebten bzw. hergestellten Zustand. Eine in situ Überwachung eines Bauwerks während seines Lebenszyklus durch permanentes Monitoring mit integrierter Sensorik ist jedoch sehr aufwendig.

Verfahren wie beispielsweise Ultraschallchotechnik mit bildgebender Darstellung, die bereits seit Jahren erfolgreich in der Werkstoffprüfung von Stahlbauteilen oder aber z.B. in der Medizintechnik angewendet werden, weil ihr Einsatz dort – im Gegensatz zum Bauwesen – heute schon als selbstverständlich angenommen wird, müssen sich im Bauwesen erst etablieren. Die Problematik der Anwendung im Bauwesen liegt darin, dass es sich bei Stahlbeton um einen heterogenen Baustoff handelt, der über die unterschiedliche Gesteinskörnung und Zementmatrix hinaus eine porenreiche Struktur aus Gelporen, Kapillarporen und Luftporen aufweist. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften metallischer und mineralischer Werkstoffe sowie wechselnde Randbedingungen wie Baustofffeuchte, Erhaltungszustand der Struktur und Beschichtungen der Oberfläche erschweren die Untersuchung von Bauteilen und Bauwerken.

Eine Serienprüfung wird dadurch erschwert, dass jedes Bauwerk ein Unikat darstellt, da sowohl die Bauausführung als auch die Konstruktion und die verwendeten Materialien selbst für gleichartige Bauwerke stark variieren können. Auch innerhalb eines Bauwerks können sich durch veränderte Randbedingungen, beispielsweise durch den zeitlichen Versatz von einzelnen Bauabschnitten, Materialkennwerte ändern.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren geben Auskunft über den tatsächlichen Zustand eines Bauwerks. Je genauer und je umfassender die Untersuchungen durchgeführt werden, desto besser lässt sich der tatsächliche Zustand des Bauteils beschreiben.

Mit der vorgestellten Automatisierungstechnik wurde eine Methodik vorgestellt, die für die Zustandsüberwachung durch wiederholende Messungen das Fortschreiten von Schäden charakterisieren kann und somit ein geeignetes Werkzeug für ein Lebensdauermanagement darstellt.

Auch bei fehlenden Bestandsunterlagen können die beschriebenen Untersuchungen wertvolle Hinweise für die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen geben.

# 8 Verzeichnisse

## 8.1 Literatur

- [Acsys] Messgerätehersteller u.a. für Ultraschallmesstechnik für Beton, [www.acsys.ru/eng](http://www.acsys.ru/eng)
- [Algernon2005] D. Algernon, Scanning impact-echo for the investigation of tendon ducts in concrete, Tagungsband: Memorandum of the Workshop of COST on NDT Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures (2005), S. 55-62
- [Adam2006] T. Adam, Dissertation: Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, TU Darmstadt 2006
- [Angst2009] Ueli Angst, et al., Diffusion potentials as source error in electrochemical measurements in concrete, Materials and Structures 2009-42 Page 365-375
- [ASTM876] ASTM C 876: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated reinforcing Steel in Concrete, Reapproved 1999
- [Baeckmann1989] W. v. Baeckmann, W. Schwenk, in Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes W. v. Baeckmann, W. Schwenk, W. Prinz, Eds. (VCH, Weinheim, 1989) pp. 513.
- [BAM2005] Website, ZfPBau-Kompendium, H. Wiggerhauser et al., <http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm>, 2005
- [BAM-GBP] Website, BAM Fachgruppe VIII.2, Großer Betonprobekörper, [www.bam.de/fg-82.htm](http://www.bam.de/fg-82.htm)
- [BetoScan] Innonet-Projekt „BetoScan“, gefördert vom BMWi, Laufzeit 2007 bis 2009, [www.betoscan.bam.de](http://www.betoscan.bam.de)
- [BMWi] Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)
- [Boller2009] C. Boller, Lebensdauermanagement von Strukturen und Systemen und die Rolle der zerstörungsfreien Prüfung, DGZfP-Berichtsbände 115-CD, DGZfP-Jahrestagung Münster, 2009

- [Breit2007] Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Untersuchungen an Mörtelelektroden in chloridhaltigen alkalischen Lösungen. *Materials and Corrosion* Volume 54 Issue 6, Pages 430 – 439
- [Broomfield2007] Broomfield J.P. *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*, London: Taylor & Francis, 2007
- [Büchler2007] M.Büchler, Y.Schiegg, *Untersuchung zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten*, SGK Zürich, Forschungsbericht im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Strassen, 2007
- [Bund2003] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Bundesverkehrswegeplan 2003, Beschluss der Bundesregierung vom 2. Juli 2003, Bonn 2001
- [BundDZ1997] Bundesverband der Deutschen Zementindustrie ; Luley, H. ; Kampen, R. ; et al: *Instandsetzen von Stahlbetonoberflächen*. 7. Aufl. Düsseldorf, Beton-Verlag, 1997
- [CHEF2009] EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms: „FP6 – 8.1 B.3.6 The protection of cultural heritage and associated conservation strategies“, Entwicklung von ZfP-Verfahren zur Feuchtemessung an historischen Gebäuden, [www.chef.bam.de](http://www.chef.bam.de)
- [Citec] Citec Survey, System zur Erfassung und Bewertung von Korrosionsschäden an Stahlbetonbauten, [www.citec-survey.com](http://www.citec-survey.com)
- [DafStB] Deutschen Ausschusses für Stahlbeton 510, *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*, 2000
- [Dauberschmidt2008] C. Dauberschmidt, *Monitoring von Verkehrsbauten – kontinuierliche Zustandserfassung zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit*, In: *Tiefbau*; Heft 3/2008; Hrsg.: BG Bau – Baugenossenschaft der Bauwirtschaft; Erich Schmidt Verlag, Berlin 2008
- [Dauberschmidt2010] C. Dauberschmidt, *Bauwerksdiagnose bei chloridbelastetem Beton – mit dem Mix der Methoden zur erfolgreichen Planung*, DBV-Arbeitstagung 2010
- [DBV2005] DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“, Fassung Januar 2005, des Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e.V.
- [DGZfP1990] DGZfP-Fachausschuss für ZfP im Bauwesen, Merkblatt B3, *Elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion*, **1990**

- [DGZFP2008] DGZfP-Fachausschuss für ZfP im Bauwesen, Merkblatt B3, Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, **2008 überarbeitete Fassung**
- [DIN 1045-1/2001] DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Beuth Verlag GmbH Berlin, 2001-07
- [DIN 1045-1/2005] DIN 1045-1 Berichtigung 2, Berichtigung zu DIN 1045-1:2001-07, Beuth Verlag GmbH Berlin, 2005-06
- [DIN50918] DIN50918, Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen, 1978
- [DIN EN ISO 8373] DIN EN ISO 8373, Industrieroboter Wörterbuch
- [DLR] Institut für Flugsystemtechnik, DLR Standort Braunschweig, [www.dlr.de](http://www.dlr.de)
- [Dobmann2008] G. Dobmann, Potential new approaches to ultrasonic quantitative NDE (QNDE) by combining high speed defect reconstruction procedures based on sampling phased array techniques with probabilistic failure assessment, Konferenzbeitrag 17<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China 2008
- [Eckhold2008] T. Eckhold, Diplomarbeit: Eignungstest ausgewählter zerstörungsfreier Messverfahren für die großflächige automatisierte Untersuchung von Parkdecks, FHTW Berlin / BAM, 2008
- [Feldbus] Wikipedia Artikel: <http://de.wikipedia.org/wiki/Feldbus>
- [Flohrrer2004] C. Flohrrer, Orten der Bewehrung und Messen der Betondeckung, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.8, S. 370–379
- [Fluge2001] F. Fluge, Marine chlorides — a probabilistic approach to derive provisions for EN 206-1, Third Workshop on “Service Life Design of Concrete Structures — From Theory to Standardisation”, DuraNet, Tromsø, 2001, pp. 63–83.
- [Garbacz2003] A.Garbacz, E. Garboczi, Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites, Nist 6975, April 2003
- [Gehlen2010] C. Gehlen, S. Greve-Dierfeld, Optimierte Zustandsprognose durch kombinierte Verfahren, Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 5, S.274ff, 2010
- [GE Inspections] Hersteller [www.geinspectionstechnologies.com](http://www.geinspectionstechnologies.com)
- [Gieler2010] S. Gieler-Bressmer, Risiken für den Parkhausbetreiber bei geplanten Übernahmen von Bestandsobjekten aus der Sicht des Bausachverständigen, Tagungsband 4.Kolloquium Verkehrsbauten, TAE Esslingen, 2010

- [Göller2007] A. Göller, Mikrowellenbasierte Rasterfeuchtemessung – Moderne Konzepte der Feuchtemessung in Bauwerken, Bautechnik 84 (2007) Heft 6, Seite 417
- [Gucunski2008] Gucunski, N., Rasco, C., Huston, D., Jalinoos, F. (2008) “Condition Assessment of Bridge Decks by Complementary Impact/Echo and Ground Penetrating Radar”, Materials Evaluation, Vol. 66, Nr 11, November 2008, pp.1125-1128.
- [Gulikers2005] Gulikers 2005 Numerical modeling of reinforcement corrosion in concrete, Ch.3 in Corrosion in reinforced concrete structures, Ed. by Hans Böhni, CRC Press, 2005.
- [GUM2008] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Internationale Organisation für Normung, Überarbeitung ISO/IEC Guide 98-3 2008
- [Harnisch2010] Harnisch, J.; Raupach, M.: Investigations Into the Time to Corrosion and Corrosion Initiating Chloride Contents for Steel in Concrete. Eurocorr 2010 13 to 17 September 2010 - Moscow/Russia
- [Herdecke2000] R. Herdecke, Dissertation an der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund, Über den Einfluss der Schichtdicke und der Alterung auf die Wirksamkeit von Oberflächenschutzsystemen für Betonbauteile, Dortmund, 2000
- [Hillemeier1998] B. Hillemeier, Bauforschungsbericht Ortung von Spannstahlbrüchen in metallischen Hüllrohren., Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [Hillemeier2008] B. Hillemeier, Schnelle und großflächige Bauzustandserfassung an Spannbetonbrücken, Estrichen und Deckensystemen, Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008, [www.bauwerksdiagnose2008.de](http://www.bauwerksdiagnose2008.de)
- [Hubbard2003] Hubbard, S.S. Zhang, J., Monteiro, P.J.M., Peterson, J.E., and Rubin, Y. Experimental Detection of Reinforcing Bar Corrosion Using Nondestructive Geophysical Techniques, ACI Materials Journal, 100-M58, 2003.
- [Hunkeler2005] Hunkeler, F. Corrosion in reinforced concrete: processes and mechanisms, Ch.1 in Corrosion in reinforced concrete structures, Ed. by Hans Böhni, CRC Press, 2005.
- [Idrissi2003] Idrissi H., Limam A. Study and characterization by acoustic emission and electrochemical measurements of concrete deterioration caused by reinforcement steel corrosion, NDT&E International, 36, 563–569, 2003.

- [IFF-Fraunhofer] Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF, Magdeburg, [www.iff-fraunhofer.de](http://www.iff-fraunhofer.de)
- [Isecke2006] B.Isecke, Experimental investigations on the propagation of reinforcement corrosion, Proceedings : European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures, ESCS-2006 (2006), S.276-281
- [ISO-OSI-Referenzmodell] Schichtenmodell der Internationalen Organisation für Normung, siehe auch <http://de.wikipedia.org/wiki/OSI-Modell>
- [IZFP-Fraunhofer] Website [www.izfp.fraunhofer.de](http://www.izfp.fraunhofer.de) Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
- [Kelting2010] D.Kelting, Review of Effects and Costs of Road De-icing with Recommendations for Winter Road Management in the Adirondack Park, Adirondack Watershed Institute, 2010
- [Kind2004] Kind, T. und Maierhofer, C.: Das Impulsradarverfahren – ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufklärung in Bauwerken, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.3, S. 333–341
- [König2003] H. König u.a., Protocol Engineering: Prinzip, Beschreibung und Entwicklung von Kommunikationsprotokollen, B. G. Teubner, Wiesbaden 2003
- [Krause2004] M.Krause, Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.3, S. 341–352
- [Kurz2009] J.H. Kurz, Control and data acquisition of automated multi-sensor systems in civil engineering, Tagungsband NDTCE 2009, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009
- [Labview] LabVIEW, grafische Programmierumgebung der Fa. National instruments, [www.ni.com/labview/d/](http://www.ni.com/labview/d/)
- [Lai2006] Lai W. L., Tsang W. F., Fang H., Xiao D., Experimental determination of bulk dielectric properties and porosity of porous asphalt and soils using GPR and a Cyclic Moisture Variation Technique, Geophysics, 71(4), K93-K102, 2006.
- [Lai2010] Lai W.L. et al, Detection of accelerated steel corrosion in concrete using Ground Penetrating Radar GPR, International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, Italy, 2010
- [Lay2003] Lay, S.: Prototype of Condition Assessment Protocol – Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability, Project LIFECON, cbm – Technische Universität München, 2003.

- [Leelalerkiet2004] Leelalerkiet V, Kyung J.W., Ohtsu M., Yokota M. Analysis of half-cell potential measurement for corrosion of reinforced Concrete. Construction and Building Materials, 2004, 18, 155–162
- [Leschnik1999] W.Leschnik, Dielektrische Untersuchung mineralischer Baustoffe in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt bei 2,45 GHz, DGZfP Berichtsband BB69, Feuchtetag 1999 BAM, Berlin
- [Maierhofer1998] Maierhofer Ch. and Wöstmann J., Investigation of dielectric properties of brick materials as a function of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high frequencies, NDT & E International, 31(4), 259-263, 1998.
- [Maierhofer2004] Maierhofer, C.: Zerstörungsfreie Ortung von Inhomogenitäten im oberflächennahen Bereich mit der Impuls-Thermografie, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.1, S. 320-329
- [Mala] Handbuch Mala CX System <http://www.malags.com/downloads>
- [Marquardt2000] N. Marquardt, Institut für Baustoffe und Bauphysik FH Nordost-niedersachsen, Ortung korrodierender Stahlbewehrung in Beton, 2000
- [Matlab] Mathematisch orientierte Hochsprache <http://www.mathworks.de/>
- [Mielentz2007] F. Mielentz, Dissertation: Einsatzpotential von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen, Dissertationsreihe Band 24 BAM Berlin, 2007
- [Mietz2004] J.Mietz, Elektrochemische Verfahren zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 3.1, S. 379-385
- [Militzer1985] H.Militzer, Angewandte Geophysik Band 2, Geoelektrik, Springer Verlag, 1985
- [Müller2009] H. Müller, H. Reinhardt, BetonKalender 2009, Konstruktiver Hochbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel I, Abschnitt 1, S.3ff
- [NASA] Mars Exploration Rover Mission, Nasa, <http://marsrover.nasa.gov>
- [Neobotix] Hersteller mobiler Roboterplattformen, [www.neobotix.de](http://www.neobotix.de)
- [Oceanexplorer] Projekt NOAA Oceanexplorer, <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/mercules/welcome.html>
- [OSSCAR2009] Innonet-Projekt Onsite-Scanner „OSSCAR“, gefördert vom BMWi, Laufzeit 2008-2010, [www.oss-car.eu](http://www.oss-car.eu)
- [Proceq] Handbuch Profometer 5+, [www.proceq.com/en/site/downloads.html](http://www.proceq.com/en/site/downloads.html)

- [Python]                Scriptsprache Python, <http://www.python.org/>
- [RAS]                    Robotics & Automation Society, Inspections Robots, <http://www.service-robots.org/applications/inspection.htm>
- [Raupach2008]         M.Raupach, 2. Symposium Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen in Abwassersanlagen, Ostfildern: 2nd Symposium on Protection and Repair of Concrete Elements in Wastewater Constructions.Ostfildern : Technische Akademie Esslingen, 2008
- [Redmer2003]         Redmer, B., Likhatchev, A., Weise, F. and U. Ewert: Location of Reinforcement in Structures by Different Methods of Gamma-Radiography, in: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD.
- [Reichling2010]       K.Reichling, Neuer Ansatz zur Lokalisierung korrosionsgefährdeter Bereiche von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen, Tagungsband 4.Kolloquium Verkehrsbauten, Seite 423ff., TAE Esslingen, 2010
- [RILEM-TC154]         RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring metallic Corrosion, Materials and Structures, Vol. 33, December 2000, pp 603 - 611
- [RI-ZFP-TU]            Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU), Ausgabe 2001, Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrsblatt-Dokument Nr. S 1050, Verkehrsblatt-Verlag (2001)
- [RRLAB]                „Robotics Research Lab“, Arbeitsgruppe Robotersysteme, Fachbereich Informatik, Technische Universität Kaiserslautern, <http://agrosy.informatik.uni-kl.de/>
- [Scheel2004]         Scheel, H. und B. Hillemeier: Das Remanenzmagnetismus-Verfahren – ein Verfahren zur Ortung von Spannstahlbrüchen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.7, S. 365-369.
- [Schießl2001]         P. Schießl, Korrosionsuntersuchungen, Praktikumsunterlagen Lehrstuhl für Baustoffkunde, TU München 2001
- [Schneck2005]         Schneck, U.: Qualifizierte Korrosionsuntersuchungen an Stahlbetonbauwerken, Bautechnik 82 (2005) Heft 7, S. 443–448
- [Schöppel2010]        K.Schöppel, Aussagekraft von Chloridwerten aus Betonbauwerken hinsichtlich der Korrosionsgefährdung, Tagungsband 4.Kolloquium Verkehrsbauten, TAE Esslingen 2010
- [Spacetec]             Website [www.spacetec.de](http://www.spacetec.de), Hersteller von Tunnelscannersystemen

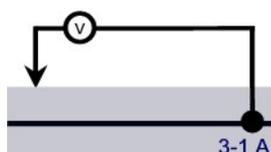
- [Stärke2009] D. Stärke, Bachelorarbeit: Optimierung der Messeffizienz einer mobilen Roboterplattform zur automatisierten zerstörungsfreien Prüfung von Betonoberflächen, TFH Wildau / BAM, 2009
- [Steck2006] Steck, M.: Zuverlässigkeit von Potentialfeldmessungen – Interpretation unter Berücksichtigung begleitender Bauwerksuntersuchungen. Diplomarbeit erstellt an der Hochschule München; Juli 2006
- [Stoppel2007] Stoppel, M., Mielentz, F. und H. Wiggenhauser: Automatisierung in der zerstörungsfreien Prüfung, Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 10, S. 562-567
- [Strauss2009] A. Strauss u.a., System- und Schadensidentifikation von Betontragstrukturen, BetonKalender 2009, Konstruktiver Hochbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 2, Kapitel VII, Abschnitt 7.4, S.110ff
- [Streicher2006] D. Streicher et al., Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken, Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 5 (2006)
- [Taffe2004] Taffe, A., Gardei, A., Krause, M., Maierhofer, Ch. Und H. Wiggenhauser, Automatisierung zerstörungsfreier Prüfverfahren für das Bauwesen, Materialprüfung 46 (2004) 7-8, S. 397-403
- [Taffe2008] Taffe, A. Dissertation: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung, Schriftenreihe des DAfStB, Beuth Verlag, Heft 574, 2008
- [Taffe2010] Taffe, A.; Stoppel, M.; Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) – Übersicht der Verfahren. In: „Betoninstandsetzung im Ingenieur- und Wohnungsbau“ 04.03.2010, Filderstadt
- [Tuutti1982] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute. - In: CBI Research (1982), Nr. Fo 4:82.
- [UBA2003] Öko-Institut/ Hydrotox GmbH, Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege. UBA Texte 09/03, Berlin. 2003
- [UnderwaterRobot] Übersicht über Unterwasserroboter [http://en.wikipedia.org/wiki/Remotely\\_operated\\_underwater\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Remotely_operated_underwater_vehicle)

- [VDI2860] VDI-Richtlinie: "Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole", VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 1990
- [Wandel2004] M.Wandel, Dissertation: Leckortung mit einem mobilen Roboter: Messungen und Simulation, Eberhard Karls-Universität Tübingen, 2004
- [Wiebe] Wiebe Gleisbau, [www.wiebe.de/georail\\_express](http://www.wiebe.de/georail_express)
- [Wiggenhauser2008] H.Wiggenhauser, Brückenuntersuchung mit automatisierten Verfahren – Neue Entwicklungen, Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben (2008) DGZfP, Vortrag 14
- [Wieland2010] M.Wieland, Feuchte- und Rissmonitoring auf Fahrbahndecken aus Beton, Fachtagung Bauwerksdiagnose 2010, Berlin, Vortrag 12
- [Wilsch2008] G.Wilsch und A. Weritz, Anwendung der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) im Bauwesen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 3.1, S. 386-396
- [Wolter2002] B.Wolter und G.Dobmann, Neue Anwendungsmöglichkeiten der NMR-Aufsatztechnik, DGZfP-Jahrestagung 2002

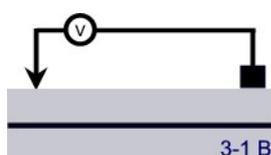
## 8.2 Verwendete Formelzeichen und Symbole

f	Frequenz
A	Messfläche
b	Spurabstand zwischen zwei Fahrspuren
d	ermittelte Tiefe einer Anzeige, eines Reflektors in einem Bauteil
l	Spurlänge
n	Anzahl der notwendigen Fahrspuren für eine flächige Abtastung
$T_{\text{ges}}$	Gesamtmesszeit für die Gesamt-Messfläche $A_{\text{ges}}$
$t_w$	Fahrzeit zum Wenden zwischen zwei Fahrspuren
$t_s$	Fahrzeit für eine Spur
$t_p$	Zeit für eine Punktmessung
k	Anzahl der Punktmessungen innerhalb einer Fahrspur
v	Fahrgeschwindigkeit des Roboters, Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen (je nach Kontext)
$\Delta t$	Kleinstmögliches Datenintervall eines Sensors
$\Delta s$	Wegstrecke
x/y	Zweidimensionales Basiskoordinatensystem
x'/y'	Zweidimensionales Koordinatensystem des Roboters
$X_r/Y_r$	Position des Roboters im Basiskoordinatensystem
$\alpha$	Drehwinkel des Roboter- zum Basiskoordinatensystem
$X_s/Y_s$	Position eines Sensors im Basiskoordinatensystem
$X'/Y'$	Offset eines Sensors zum Ursprung des Roboterkoordinatensystems
$\varepsilon, \varepsilon_r$	Permittivität (dielektrische Leitfähigkeit, frühere Bezeichnung Dielektrizitätszahl), relative Permittivität
a	Abstand zwischen zwei Elektroden
w	Randbreite eines Potentialtrichters
s	Anodenlänge
d	Anodendurchmesser
t	Betondeckung
R	Widerstand

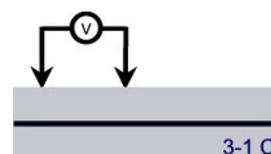
$\rho$	Spezifischer Widerstand
U	Spannung / Messspannung
$I_k$	Makroelementstrom
b	Halbwertsbreite
G	Gradientenbreite



Konventionelle Potentialfeldmessung mit Bewehrungsanschluss und beweglicher Referenzelektrode.



Potentialfeldmessung mit zwei Referenzelektroden. Die zweite Elektrode bleibt ortsfest im Bereich des nicht mehr genutzten Bewehrungsanschlusses.



Differenzpotentialfeldmessung (DP-Messung) mit zwei beweglichen Elektroden, die gemeinsam mit einem festen Abstand zueinander über die Messfläche geführt werden.

## 8.3 Glossar

Die nun folgenden Begriffe und Abkürzungen werden in dieser Arbeit häufig verwendet. Auch um Missverständnisse aufgrund unterschiedlicher Definitionen zu vermeiden, werden hier einige Begriffe entsprechend ihrer Verwendung definiert:

API	engl. Application programming interface, deutsch: „Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung“
Aussagesicherheit	Grad mit der eine getroffene Aussage mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Die Aussagesicherheit wird in der vorliegenden Arbeit nicht als mathematische Größe aufgefasst.
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
Bestandserfassung	Die Bestandserfassung dient der reinen Aufnahme eines Bestandes, beispielsweise der Ermittlung der Betonüberdeckung und des Durchmessers von Bewehrungsstäben. Vgl. Zustandsermittlung und Schadensdiagnose
Betonüberdeckung, Betondeckung	Abstand zwischen der Oberfläche eines in Beton eingelassenen Bewehrungsstabes und der nächstgelegenen Betonoberfläche
Detektionswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit mit der ein möglicher korrosionaktiver Bereich aufgefunden wird. Gemeint ist nicht die Wahrscheinlichkeit, ob Korrosion tatsächlich vorliegt.
Differenzpotentialfeldmessung, DP-Messung	Neues Verfahren mit zwei beweglichen Elektroden, die gemeinsam mit einem festen Abstand zueinander über die Messfläche geführt werden, ohne Anschluss an die Bewehrung.
Ethernet	Kabelgebundene Datennetztechnik die ursprünglich für lokale Datennetze (LAN) entwickelt wurde und den Datenaustausch in Form von Datenpaketen zwischen angeschlossenen Geräten wie Computern und Messgeräten ermöglicht.
dGPS	Differential Global Positioning System, auf GPS basierendes System mit lokaler Referenz zur Verbesserung der Ortungsgenauigkeit
DP-Messung	Differenzpotentialfeldmessung
Drehgeber	Siehe Winkelcodierer
Firmware	Interne in elektronische Geräte eingebettete Software, die nur vom Hersteller modifiziert werden kann.
GPS	Global Positioning System, globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung und Zeitmessung
GUI	Grafischer User Interface, Bedienoberfläche

Halbautomatische Messung	Messung, bei der Messwerte elektronisch aufgenommen werden, der Sensor wird aber manuell geführt.
Handnahe Prüfung	Handmessung, Manuelle Ausführung einer Prüfung mit einem Handmessgerät
IZFP	Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken und Dresden
(Dis-)Kontinuierliche Messungen	Als kontinuierliche Messungen werden in dieser Arbeit Messabläufe bezeichnet, bei denen eine Messung mit (meist) berührungslos arbeitenden Sensoren permanent während der Fahrtbewegung ausgeführt werden. Bei einer diskontinuierlichen Messung ist ein temporärer Stopp der Roboterplattform notwendig, um den jeweiligen Sensorkopf am Untersuchungsobjekt zu platzieren und auf eine Freigabe zur Weiterfahrt nach erfolgter Messung zu warten.
Landmarken	Als Landmarken werden Objekte bezeichnet, die eindeutig Grenzen und Gebiete in einem Raum markieren.
Map	Vom Nutzer interaktiv erstellte und speicherbare Grundrisskarte des Navigationssystems
Messpunktabstand	Abstand der einzelnen Messpunkte (nur) in Fahrtrichtung
Multisensorik	Mehrere Sensoren gleicher oder verschiedener Art, die gleichzeitig in einem Messsystem verwendet werden
Pose	Position und Orientierung eines Roboters in einem kartesischen Koordinatensystem.
Rechner	Mikrocomputer, in Ausführung als PC, Notebook oder Kompakt-PC (Embedded-PC)
Roadmap	Fahrplanungsplan der Navigationssoftware mit Stationspunkten und deren mögliche Verbindungen
Schadensdiagnose	In der Schadensdiagnose wird versucht den ursächlichen Zusammenhang für das Auftreten des Schadens zu finden, beispielsweise warum ein Bewehrungsstahl korrodiert ist, vgl. Bestandserfassung und Zustandsermittlung
Sensor, Sensorik	Als Sensor wird im Allgemeinen ein technisches Bauteil beschrieben, das als Messaufnehmer eine bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaft in ein messbares elektrisches Signal umformt. Der Begriff Sensor oder Sensorik wird zur Vereinfachung in dieser Arbeit synonym für alle Messgeräte verwendet, auch wenn diese meist nicht nur aus diesem Bauteil, dem Sensorkopf, sondern auch weiteren Komponenten besteht.

Die Abgrenzung der Begriffe Sensor und Messgrößenaufnehmer, Messfühler, Messgerät o.ä. ist fließend, da einem Sensor zusätzlich zum Aufnehmer meist weitere Elemente der Messkette wie Verstärker oder Anzeigeelemente zugeordnet werden. Auch verwandte Begriffe sind in der Literatur nicht eindeutig definiert.

Der Begriff Sensor wird in dieser Arbeit sowohl für die zerstörungsfreie Messtechnik am Objekt als auch für die Messtechnik zur Positionsbestimmung verwendet.

Sensorkopf	Als Sensorkopf wird derjenige Teil eines Messgerätes bezeichnet, der in die Nähe des zu untersuchenden Objektes gebracht wird. Bei einem Radargerät ist dies beispielsweise die Antenne.
Socket	bidirektionale Softwareschnittstelle zur Netzwerkkommunikation
System	Ein System besteht aus mehreren Einzelkomponenten, die jede für sich bestimmte Aufgaben zugewiesen bekommen. Komponenten können sowohl Hard- als auch Softwarekomponenten sein.
Winkelcodierer	Winkelcodierer (oder auch Drehgeber, Positionsrads) wandeln Drehbewegungen in einen Messwert um, für jeden Positionswert wird ein Impuls (inkrementaler Geber) oder ein Code (absoluter Geber) ausgegeben
Zeitnahe Messung	Aufnahme einer Messgröße und sofortige Umwandlung und Weitergabe an ein digitales System (Rechner), deutsches Äquivalent zu „Online“-Messung oder „In-Situ“-Messung. „Zeitnahe Messung“ ist am meisten ehesten als Übersetzung geeignet, da der Begriff „Echtzeit“ in der Informatik und Rechner-technik anders besetzt ist.
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
Zustandsermittlung	Die Zustandsermittlung soll Auskunft über den Zustand eines Bauteils geben, beispielsweise über die Korrosionsaktivität eines Bewehrungsstahls, vgl. Bestandserfassung und Schadensdiagnose
Zustandsüberwachung	engl.: Structural Health Monitoring (SHM), ganzheitliche Betrachtung einer Bauteilstruktur über den gesamten Lebenszyklus

# 9 Anhang

## 9.1 Allgemeines

Eine umfangreiche Dokumentation und Gliederung der Messverfahren nach Messprinzip und Messmethode findet sich im Internet im ZfPBau-Kompodium der BAM [BAM2005].

Dieser Arbeit liegen nur Verfahren zu Grunde, die für eine automatisierte Untersuchung von Stahlbetonflächen geeignet sind. Im Folgenden wird eine Auswahl von Verfahren aufgeführt, die die Bandbreite der ZfP-Verfahren im Bauwesen aufzeigen sollen. Diese reicht von visuellen, akustischen, mechanischen, thermischen, elektrischen, magnetischen, chemischen bis zu strahlungsemitierenden Verfahren.

Beispielsweise werden elektromagnetische Felder und Wellen in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen in nahezu allen Frequenzbereichen verwendet:

- Gleichfelder für die Magnetisierung von Bewehrungsstahl
- Erzeugung von Wirbelströmen in der Bewehrung im Bereich von einigen Hertz bis in den kHz-Bereich
- Impuls-Radar mit Mittenfrequenzen im Bereich von 200 kHz bis 2,6 GHz
- Mikrowellenfeuchtemessungen im Bereich um 2,45 GHz
- Infrarot-Thermografie im Bereich von 3GHz bis 300 GHz (Wärmestrahlung)
- Radiografie  $10^{16}$  bis  $10^{21}$  Hz (Röntgen- und Gammastrahlung)

Diese Verfahren können prinzipbedingt alle in den Bereich kontinuierlich messender, berührungslos arbeitender Sensoren eingeordnet werden.

Anders verhält es sich im akustischen Bereich. Hier sind prinzipbedingt, mit der Ausnahme von Entwicklungen mit Luftultraschall, alle Verfahren als diskontinuierlich wegen der notwendigen festen Ankopplung eines Sensorkopfes an das Prüfobjekt anzusehen. Die in der Metallwerkstoffprüfung übliche Verwendung von Koppelmitteln wie Gelen oder Wasser ist aufgrund der Oberflächenstruktur von Beton meist nicht für eine Automatisierung geeignet. Akustische Verfahren wie Ultraschall und Impakt-Echo verwenden Frequenzen im kHz-Bereich.

Verfahren, die auf stationär installierten Sensoren zur dauerhaften Bauwerksuntersuchung (Monitoring) beruhen, wie beispielsweise die Schallemissionsanalyse, finden in der vorliegenden Arbeit keine Berücksichtigung.

Nachfolgend einige Richtwerte für Materialkennwerte:

Tabelle 5 Materialkennwerte

Kennwert [Einheit]	Beton C30/37	Stahl	Wasser	Luft
akustische Transversalwellen geschwindigkeit [m/s]	2355	3255	-	-
akustische Longitudinalwellen geschwindigkeit [m/s]	3845	5920	1484	343
Relative Permittivität $\epsilon_r$ [dimensionslos]	2 ... 10		80	
Relative magnetische Permeabilität $\mu_r$ [dimensionslos]	1	300...10000	1	1
Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen [m/s]	$100 \cdot 10^6$		$33 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^8$

Da in dieser Arbeit die Automatisierung im Vordergrund steht, wurden zur Auswahl geeigneter automatisierbarer Verfahren folgende Auswahlkriterien zugrunde gelegt (siehe Abbildung 9-1)

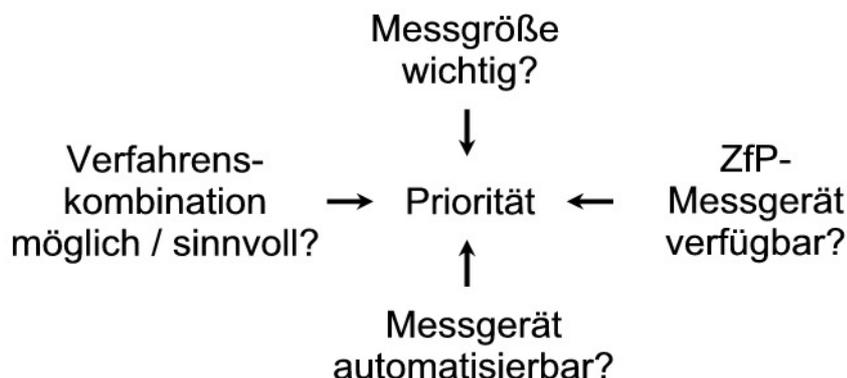


Abbildung 9-1 Priorisierung der Auswahlkriterien für die automatisierte Verwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren

Jede der in Abbildung 9-1 genannten Kriterien hat einen direkten Einfluss darauf, ob ein Messgerät für eine automatisierte Messung in Frage kommt, da sich nicht automatisierbare oder nicht zerstörungsfrei arbeitende Verfahren für die robotergestützte Messung ungeeignet sind. Sind mehrere Verfahren für eine Messgröße verfügbar, so kann unter Umständen eine Verfahrenskombination zur Erhöhung der Aussagesicherheit sinnvoll sein.

Die Vielzahl an möglichen Messgrößen erfordert eine Eingrenzung, inwieweit die jeweilige Messgröße für den Einsatzbereich (Erkundung oder Qualitätssicherung) notwendig ist.

Tabelle 6 gibt Aufschluss über eine Priorisierung der Messgrößen, wie sie im BetoScan-Forschungsvorhaben (siehe auch Kapitel 2.3.2, [BetoScan]) von sachkundigen Bauingenieuren vorgenommen wurde.

Tabelle 6 Einteilung der Werkstoffe und deren Kenngrößen zur Priorisierung nach Einsatzgebiet (++ sehr wichtig, + wichtig, o neutral, - unwichtig)

Werkstoff	Messgröße	Priorität nach Einsatzbereich	
		Erkundung	Qualitätssicherung
Bewehrung	Betondeckung	++	++
	Bewehrungsverteilung	++	+
	Bewehrungsdurchmesser	+	o
	Korrosionswahrscheinlichkeit	++	o
Beton	Rissbild	++	+
	Rissbreite	++	+
	Risstiefe	+	o
	Leitfähigkeit	++	o
	Hohllagen / Abplatzungen	++	o
	Bauteildicke	o	+
	Bauteilfeuchte	++	o
	Oberflächentemperatur	+	o
	Betonqualität (Gleichmässigkeit, E-Modul)	+	+
	Festigkeit	-	o
	Oberflächenschutz- Systeme	Unterläufigkeit / Ablösungen	+
Gesamtschichtdicke		o	++
Einzelschichtdicke		o	++
Umgebung	Temperatur	++	o
	Luftfeuchte	o	o

Bei dieser Auswahl ist zu beachten, dass sich ein Verfahren nicht ausschließlich dem Zustand nur einer Messgröße oder einem Werkstoff des Verbunds zuordnen lässt, da untereinander Abhängigkeiten bestehen, wie folgende Beispiele zeigen:

- Die Bewehrung in einem sehr jungen, feuchten Beton lässt sich mit Radar aufgrund des hohen Wasseranteils nicht untersuchen.
- Mit einer Ultraschallmessung lässt sich eine Bauteildicke bestimmen aber auch die Lage der Bewehrung.
- Mit der Potentialfeldmessung kann eine Korrosionswahrscheinlichkeit bestimmt werden, die aber im Zusammenhang mit der Leitfähigkeit und dem Chlorid- und Feuchtegehalt des Betons betrachtet werden muss.

Idealerweise wird jedes Verfahren also unter den entsprechenden Randbedingungen und unter Berücksichtigung seiner primären Vorzüge eingesetzt. Zur vollständigen Erfassung

einer Messgröße oder zur Verbesserung der Aussagesicherheit kann oft auch die Kombination mehrerer Verfahren erforderlich sein.

Tabelle 7 stellt den verschiedenen Messgrößen und die möglichen anzuwendenden Verfahren gegenüber. Messgrößen wie Betonüberdeckung, Bewehrungsanordnung, Bauteildicke, Feuchte, Leitfähigkeit und Ruhepotential, die mit zerstörungsfreien Verfahren ermittelt werden, liefern nicht nur einzeln, sondern gerade in Kombination wichtige Kenngrößen für die Bewertung des Zustands eines Stahlbetonbauwerks.

Tabelle 7 Gegenüberstellung der Messgrößen für Stahlbeton und geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren.  
 x: Zur Messgröße passendes Verfahren  
 (x): eingeschränkt nutzbares Verfahren, nur unter gewissen Randbedingungen, Stand der Forschung, Thema von Forschungsarbeiten.

Messgröße	Verfahren										
	Wirbelstrom	Radar	Ultraschall	Impakt-Echo	Mikrowelle	Potentialfeld	Leitfähigkeit	Rückprallhammer	Optische Verfahren	„Klimasensoren“	Nicht zerstörungsfrei messbar
Betondeckung	x	x									
Bewehrungsverteilung	x	x									
Bewehrungsdurchmesser	x										
Korrosionswahrscheinlichkeit (Verfahrenskombination notwendig!)	x				x	x	x			x	
Rissbild									x		
Rissbreite			(x)								
Risstiefe			(x)								
Elektrolytischer Betonwiderstand							x				
Hohllagen / Abplatzungen			x								
Bauteildicke		x	x	x							
Bauteilfeuchte		(x)			x						
Oberflächentemperatur										x	
Betonqualität (Gleichmässigkeit, E-Modul)											x
Festigkeit (oberflächennah)								x			
Festigkeit (gesamtes Volumen)											x
Unterläufigkeit / Ablösungen			x								
Chloridgehalt											x
Karbonatisierungstiefe											x
Gesamtschichtdicke											x
Einzelschichtdicke											x
Temperatur										x	
Luftfeuchte										x	

Ist für ein Verfahren überhaupt ein zerstörungsfrei arbeitendes, kommerziell erhältliches

Messgerät vorhanden, so stellt sich als nächstes die Frage, ob eine automatisierte Messung damit möglich ist. Die Beantwortung dieser Frage wird im Kapitel 9.5 ausführlich behandelt. Existieren mehrere Verfahren, mit denen eine Messgröße quantifiziert werden kann, sollte dasjenige Verfahren gewählt werden, mit dem die aussagekräftigeren Ergebnisse zu erwarten sind. Der Einsatz mehrerer Verfahren sollte in Erwägung gezogen werden, wenn dadurch ein Erkenntniszuwachs oder eine weitere Steigerung der Aussagesicherheit zu erwarten ist. Im Idealfall lässt eine kombinierte Verwendung unterschiedlicher Verfahren für die gleiche Messgröße eine Kalibrierung, Verifizierung oder gar Validierung zu (Kapitel 4.4). Ein weiterer wichtiger Punkt zur Auswahl der passenden Verfahren für die Ermittlung der relevanten Kenngrößen ist die Zugänglichkeit zum Bauwerk. In einem hohen Prozentsatz aller Fälle kann das Bauteil nur von einer Seite bzw. Oberfläche untersucht werden. Es kommen in diesem Fall nur Verfahren in Frage, bei denen das Messprinzip auf einer Reflexion oder einseitiger Rückwirkung des Materials beruht. Eine Transmissionsanordnung wie sie beispielsweise in der Radiografie benötigt wird, ist von vornherein ausgeschlossen.

Bildgebende, optische, nicht und schwer automatisierbare sowie nicht zerstörungsfreie Verfahren und Verfahren für die Bewertung von Oberflächenschutzsystemen wurden nicht berücksichtigt und sind deshalb hier im Anhang aufgeführt.

Per Definition werden in dieser Arbeit Verfahren nach der Automatisierbarkeit und der Verwendung ihres Sensorkopfes in **kontinuierlich und diskontinuierlich** messende Verfahren unterschieden.

**Kontinuierlich** messende Verfahren sind Verfahren, die entweder berührungslos oder mit einer radähnlichen Vorrichtung permanent während der Fahrbewegung in kleinsten Intervallen einen Messwert liefern können. Für **diskontinuierliche** Verfahren ist eine Unterbrechung der Fahrbewegung notwendig, um den jeweiligen Sensorkopf an das zu untersuchende Bauteil mechanisch anzukoppeln.

## 9.2 Automatisierbare ZfP-Verfahren

Die Kernfrage, die sich aus den geschilderten Grundlagen, Verfahren und Geräten sowie den Erfahrungen aus Multisensorik-Messsystemen ergibt, ist, ob und mit welchen Maßnahmen sich Systeme zur großflächigen Zustandsermittlung von Stahlbetonflächen, speziell zum Einsatz in Parkhäusern, konstruieren lassen und ob damit die Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen verbessert werden kann.

Dazu müssen im Einzelnen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie müssen Standard-Handmessgeräte modifiziert werden, damit sie automatisiert verwendet werden können?
- Wie können Positionsdaten mit hinreichender Genauigkeit ermittelt und mit den Messdaten verknüpft werden?
- Mit welchem Raster müssen Messdaten erhoben werden, damit Schäden erkennbar und mit hinreichender Sicherheit erfasst werden?
- Wie können große Flächen effizient mit diesem Raster abgetastet werden?
- Wie kann eine sinnvolle Verdichtung zur Visualisierung der Daten durchgeführt werden?
- Wie stellt man Daten, die am gleichen Ort mit mehreren Sensoren erhoben wurden, für den Nutzer geeignet dar?
- Welche Verfahrenskombination führt zu einem Mehrwert?
- Ergeben sich aus der Möglichkeit, großflächig ortsreferenziert Messdaten mit einer hohen Messpunktdichte aufnehmen zu können, mehr Informationen?
- Können neue Verfahren daraus entwickelt werden?
- Wie kann ein komplexes System aus einer Vielzahl von Komponenten zweckmäßig entwickelt und getestet werden?

Im Folgenden werden weitere gut automatisierbare Verfahren beschrieben.

### 9.2.1 Remanenzmagnetismus

Mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren können Spanndrahtbrüche im Spannbeton zerstörungsfrei geortet werden. Bei diesem Verfahren werden starke Elektromagnete über die (gegebenenfalls vorab mit dem Radarverfahren (siehe Kapitel 9.2.2) lokalisierte) Spannkanäle geführt. Dabei werden die Spannstäbe bis zur Sättigung magnetisiert. Anschließend behält der Stahl eine Magnetisierung, die sogenannte Remanenz, bei, d.h. die Spannstäbe behalten, nachdem das Magnetfeld abgeschaltet oder die Magneten fortbewegt wurden, eine messbare magnetische Flussdichte, deren Transversalkomponente mit einem Sensor (Hallsonde) an der Oberfläche aufgezeichnet werden kann.

An den Bruchstellen einzelner Spanndrähte bilden sich neue Nord- und Südpole aus (Abbildung 9-2 A). Das hervorgerufene Streufeld dieser Bruchstellen ist an der

Betonoberfläche messbar. Die Stärke dieses signifikanten Signals gibt Auskunft über die Querschnittsschwächung des Spanngliedes. In der Regel lassen sich Einzelbrüche aufspüren, wenn die Betondeckung kleiner als das Zwanzigfache des Drahtdurchmessers ist [Hillemeier1998], [Scheel2004].

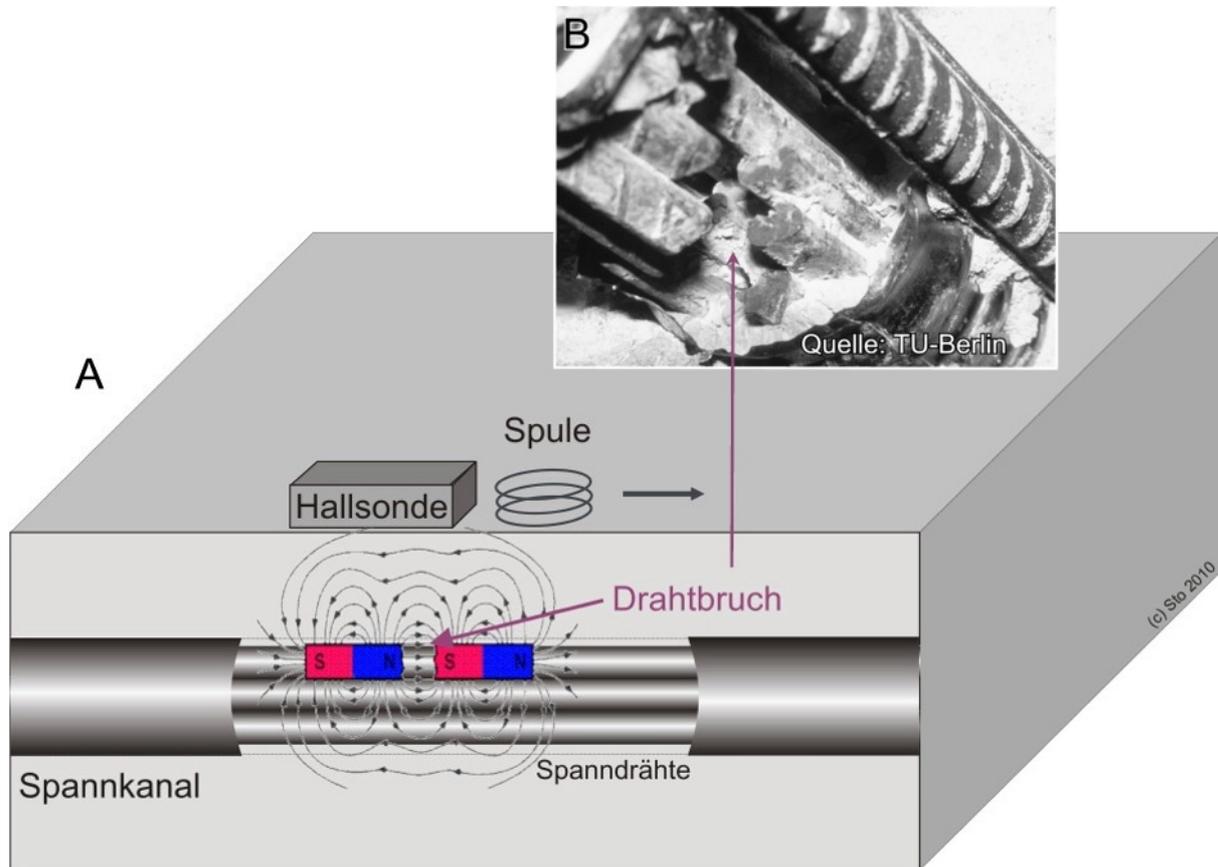


Abbildung 9-2 A: Schematische Darstellung der Methode: Durch ein starkes Magnetfeld großer Spulen wird der Spannstahl bis zur Remanenz magnetisiert, an Bruchstellen bilden sich Dipole aus, die ein magnetisches Streufeld erzeugen, dessen transversale Komponente mit einer Hallsonde an der Oberfläche erfasst werden kann, B: Bruchstelle eines Spanngliedes aufgrund vorangegangener Spannungsrisskorrosion

Für die Anwendung des Remanenzmagnetismus gibt es bereits eine automatisierte Anwendungsplattform [Hillemeier2008], mit der in einem Arbeitsschritt eine Magnetisierung und anschließende Messung durchgeführt werden kann.

Für eigene automatisierte Entwicklungen ist zu beachten, dass sehr große Spulen mit großem Strombedarf zur Magnetisierung der Spannkanaäle erforderlich sind, die deshalb nicht an einem autonomen, batteriebetriebenen System eingesetzt werden können.

## 9.2.2 Radar

Die in der Geophysik etablierte Radarmesstechnik findet immer mehr Eingang in die Materialprüfung im Bauwesen. In den letzten zwanzig Jahren wurde das Impulsradarverfahren für Anwendungen im Bauwesen weiterentwickelt und an die dort vorhandenen Fragestellungen angepasst. Es wird heute erfolgreich zur Ortung von Hohlräumen und Einbauteilen innerhalb von Wänden, Böden und Baugründen, zur Ortung von Bewehrung und Spanngliedern in Beton und zur Dickenbestimmung von Wänden, Böden und Decken eingesetzt. Durch zahlreiche Untersuchungen [Kind2004] wurde die effiziente Wirkungsweise auch bei Stahlbetonbauteilen nachgewiesen.

Abbildung 9-3 zeigt den prinzipiellen Messaufbau und typische Darstellungen (Radargramme) von Messspuren sowie die reale Abbildung von Reflektoren durch Rekonstruktion der Messdaten.

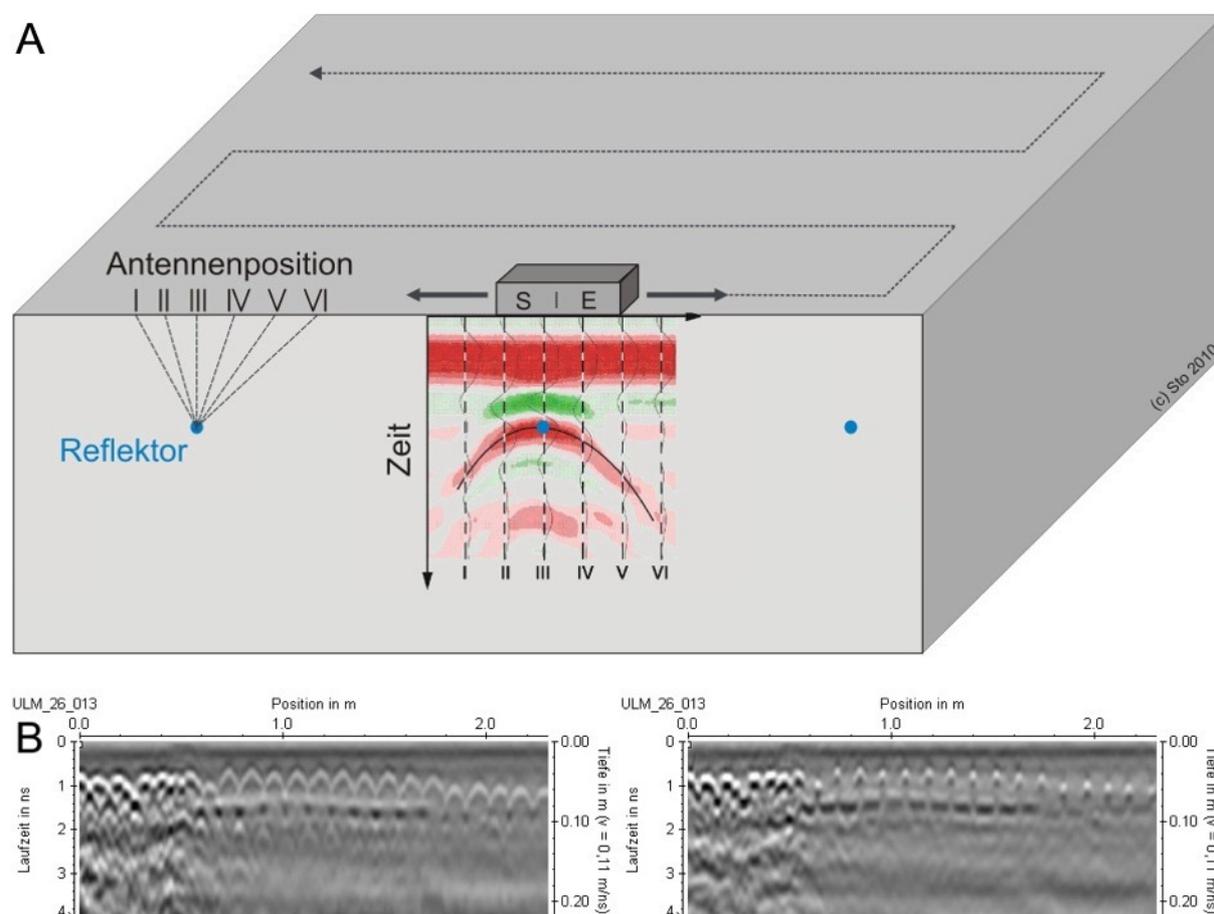


Abbildung 9-3 A: Schematische Darstellung einer Radarmessung. Bei der Abtastung der Oberfläche werden die Laufzeitsignale eines Reflektors über den Ort aufgetragen, eine typische Reflexionshyperbel bildet sich aus, B: B-Bild (Radargramm, links) mit Reflexionshyperbeln schlaffer Bewehrung, im linken Bereich bis 0,6 m dichter bewehrt, und die Rekonstruktion (rechts) der Daten

Das Impulsradar ist ein Puls-Echo-Verfahren, bei dem eine hochfrequente elektromagnetische Welle sich von einer Antenne ablöst und im Bauteil ausbreitet. An Grenzflächen mit deutlicher Änderung der dielektrischen Eigenschaften, die innerhalb eines Bauteils beim Übergang an verschiedene Materialien auftreten, beispielsweise Beton zu Stahl oder Beton zu Luft, werden die Impulse reflektiert. Voraussetzung ist, dass die Dämpfung der elektromagnetischen Impulswelle durch das umgebene Material nicht zu groß wird.

Das trifft unter anderem auf schlaffe Bewehrung und Hüllrohre von Spannstahlkonstruktionen sowie auf Bauteilkanten und ausreichend große Fehlstellen in Betonbauteilen zu, so dass diese geortet werden können. Mit dem Verfahren kann direkt die auf die Oberfläche projizierte Lage der zu suchenden Objekte bestimmt und bildlich angezeigt werden. Darüber hinaus lässt sich auch die Tiefenlage des Objektes durch eine Kalibrierung der Laufzeiten der Reflexionen ermitteln.

Die Messung lässt sich zügig durchführen, wobei die Radarantennen entlang von Linien eines vorher aufgezeichneten Messrasters an der Oberfläche geführt werden. Ein direkter Kontakt der Antenne mit der Bauteiloberfläche ist nicht unbedingt erforderlich. Für die Auswertung der Messdaten stehen kommerzielle Auswertungsprogramme zur Verfügung.

Mit dem Radarverfahren können gegenüber dem Wirbelstromverfahren, das auf die obere Bewehrungslage begrenzt ist, zusätzliche Informationen, wie beispielsweise die Ortung von Fehlstellen, Hohllagen und Spanngliedern, auch in tieferen Lagen gewonnen werden. Je nach dem verwendeten Antennentyp, dem Frequenzbereich und dem Bewehrungsgrad können mit dem Radarverfahren Bauteildicken im Stahlbeton bis zu einem Meter ermittelt werden.

Eine automatisierte Anwendung des Radarverfahrens wird für Straßen- und Gleisbettuntersuchungen (siehe Kapitel 2.3.4) mit verknüpfter GPS-Technik zur ortsbezogenen Messwertermittlung eingesetzt. Im Bauwesen ist der Einsatz von einfacher GPS-Technik zu ungenau oder in den meisten Fällen durch die Verwendung in geschlossenen Räumen unmöglich (siehe auch Kapitel 2.3.3 Positionsbestimmung).

### **9.2.3 Ultraschall**

Ultraschall-Verfahren gehören zu den hochentwickeltesten Prüfverfahren für die Materialuntersuchung und Werkstoffprüfung. Noch zu Beginn der 90er Jahre wurde deren Einsatz bei der Prüfung von Betonbauteilen aber als wenig aussichtsreich angesehen. Seitdem haben Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Lösungen und kommerziell erhältlichen Messgeräten geführt, die in der Praxis erfolgreich angewendet werden.

Mit dem Ultraschall-Verfahren werden im Bauwesen Bauteildicken gemessen und Strukturelemente oder Unregelmäßigkeiten geortet.

Der Vorteil bei Ultraschallverfahren im Bauwesen liegt darin begründet, dass ein zu untersuchendes Objekt für die Anwendung in Bauwerksuntersuchungen nur von einer Seite zugänglich sein muss (Echo-Verfahren). Die Messung einer Bauteildicke ist aber auch per Durchschallung möglich.

Die von piezoelektrischen Ultraschallwandlern erzeugten pulsartigen Schallwellen einer bestimmten Wellenart (Longitudinal- oder Transversalwellen) werden in ein Bauteil eingekoppelt. Die Schallwellen werden bei Änderung der akustischen Impedanz (abhängig von der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und Rohdichte des Materials) im untersuchten Bauteil gebrochen und reflektiert. An Außenflächen, Hohlräumen und Rissen, d.h. an Übergängen bzw. Grenzflächen zur Luft, erfolgt nahezu eine Totalreflexion. Bei der Reflexion zu einem akustisch dünneren Medium erfährt eine Welle oder ein Wellenpuls einen Phasensprung von  $180^\circ$ . Damit kann im Prinzip der Übergang Beton/Stahl (dichteres Medium) vom Übergang Beton/Luft (dünneres Medium) unterschieden werden.

Aus der Laufzeit der reflektierten Pulse kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit die Entfernung einer Anzeige vom Prüfkopf angegeben und durch Abtasten eines Oberflächenbereiches deren Ausmaße bestimmt werden (siehe Abbildung 9-4).

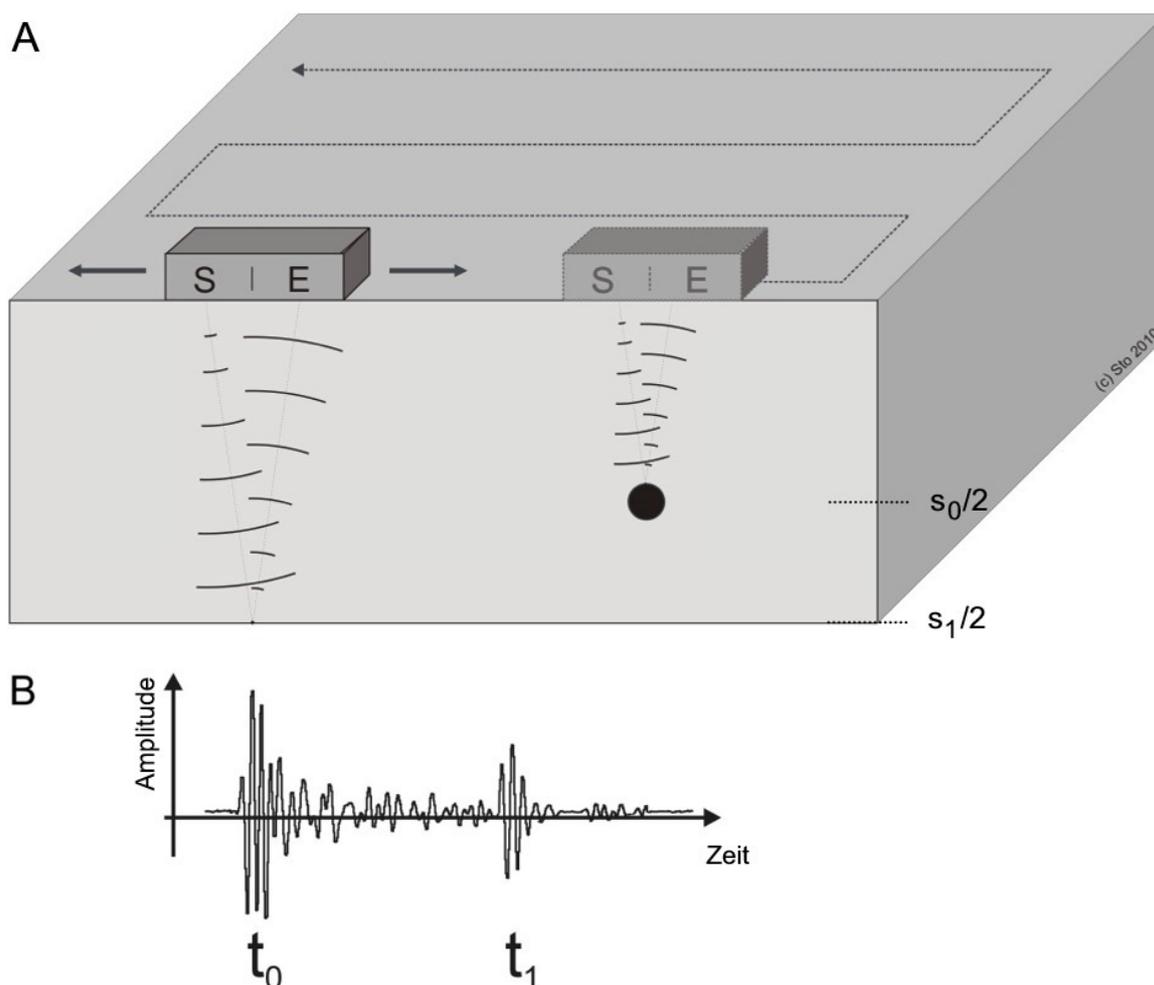


Abbildung 9-4 A: Schematischer Messaufbau mit SE-Prüfkopf: Einkoppelte akustische Transversal- oder Longitudinalwellen werden an akustischen Grenzflächen reflektiert:

B: Typisches Laufzeitdiagramm: Über eine Kalibrierung kann die Schallausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt werden und somit auf die Tiefe  $s/2$  eines Reflektors, dessen Signal zum Zeitpunkt  $t$  erscheint, geschlossen werden.

Für die Anwendung des Ultraschall-Echoverfahrens für Betonbauteile muss mit großen Wellenlängen, also niedrigen Frequenzen, gearbeitet werden, damit eine nennenswerte

Eindringtiefe erreicht wird. Der dafür sinnvolle Frequenzbereich liegt zwischen 50 und 250 kHz, was einer Wellenlänge von 80 bis 16 mm entspricht (bei einer für Stahlbeton typischen Longitudinalwellengeschwindigkeit von 4000 m/s).

Der Grund dafür liegt im inhomogenen Aufbau des Verbundwerkstoffes Beton aus einer Zementmatrix und Zuschlägen sowie dem Stahl als schlaaffe Bewehrung bzw. als Spannglieder in Spannstahlkonstruktionen.

In der baupraktischen Anwendung wird mit sehr niederfrequenten breitbandigen Prüfköpfen mit Mittenfrequenzen im Bereich von 40 kHz bis 200 kHz gearbeitet. Die verwendeten Wellenlängen ( $\lambda = 2$  bis 10 cm bei einer angenommenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 4000 m/s von Longitudinalwellen in Beton) liegen damit in der Größenordnung des im Beton verwendeten Größtkorns von 16 mm bzw. 32 mm, weshalb starke Streueffekte auftreten können. Verwendet man größere Wellenlängen, also kleinere Frequenzen, werden die störenden Einflüsse der Streuwellen zwar geringer, gleichzeitig reduziert sich aber auch das Auflösungsvermögen zur Ortung von Fehl- oder Schadstellen im Bauteil. Der Einfluss von Luftporen wird in [Mielentz2007] ausführlich behandelt.

Um Schallwellen vom Prüfkopf in ein Bauteil mit hinreichend großer Energie einkoppeln zu können, bedient man sich diverser Koppelmittel wie Öle, Glycerin, Vaseline oder Wasser. Bei metallischen Werkstoffen stellt dies kein Problem dar, für eine großflächige Anwendung in der Bauwerksuntersuchung sind Koppelmittel eher hinderlich und bereiten Probleme in der Anwendung. Deshalb wurde in den letzten Jahren die Anwendung von Punktkontaktprüfköpfen forciert, die keine Koppelmittel benötigen, da sie durch die Bündelung mehrerer Einzelköpfe hinreichend Schallenergie in das Bauteil einbringen können, auch wenn diese Energie nur einen Bruchteil der Schallenergie eines flächigen, mit Koppelmitteln angekoppelten Standardprüfkopfes erreicht. Gleichzeitig wird durch die Arrayanordnung eine gute Fokussierung des Schallbündels erreicht. Abbildung 9-5 A zeigt einen Transversalwellen-Sende-Empfangskopf mit je 12 Einzelpunktkontaktköpfen, die zu einer Sende- bzw. Empfangsgruppe zusammengeschaltet sind.

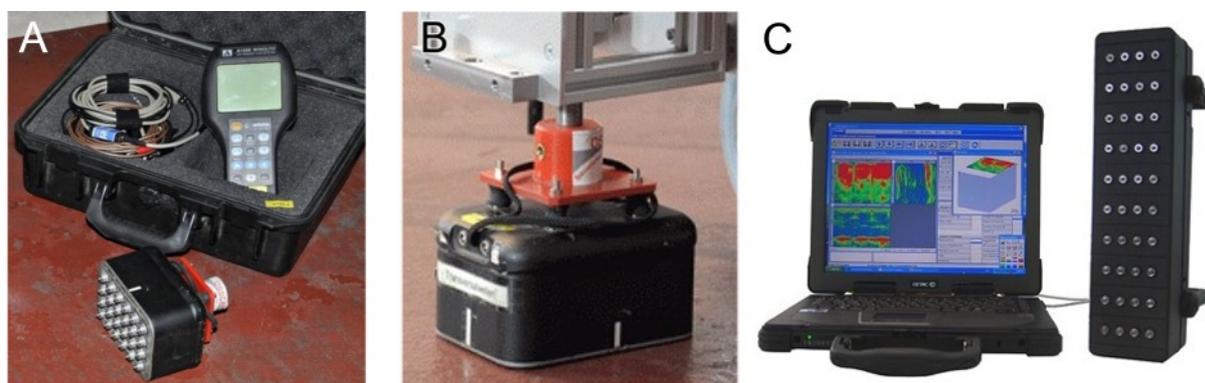


Abbildung 9-5 A: Punktkontaktprüfkopf mit Handmessgerät, B: Koppelmittelfrei angekoppelter Ultraschallprüfkopf, C: Phased-Array-Anordnung der Punktkontaktmessköpfe mit Auswertungs-elektronik

Neueste Entwicklungen verfolgen den Ansatz der in der Standard-Ultraschalltechnik lange etablierten Technik von Sampling-Phased-Array-Anordnungen, bei der einzelne Gruppen von Punktmessköpfen einzeln, zeitlich gezielt nacheinander sowohl als Sender wie Empfänger angesteuert werden können und somit eine Variation des Einschallwinkels ermöglichen (Abbildung 9-5 C).

Die aktuelle Entwicklung für die automatisierte Anwendung von Ultraschall mit scannenden Prüfsystemen an Betonbauteilen wird beispielsweise in [Wiggenhauser2008] ausführlich beschrieben.

### 9.2.4 Impakt-Echo

Das Haupteinsatzgebiet für das Impakt-Echo-Verfahren im Bauwesen ist die Dickenmessung von Bauteilen. Bei diesem Verfahren wird durch einen mechanischen Schlag eine akustische Welle in das Bauteil eingeleitet (Abbildung 9-6). An der Bauteiloberfläche wird anschließend die Impulsantwort inklusive aller Mehrfachechos mit niederfrequenten piezoelektrischen Beschleunigungssensoren aufgenommen und digitalisiert.

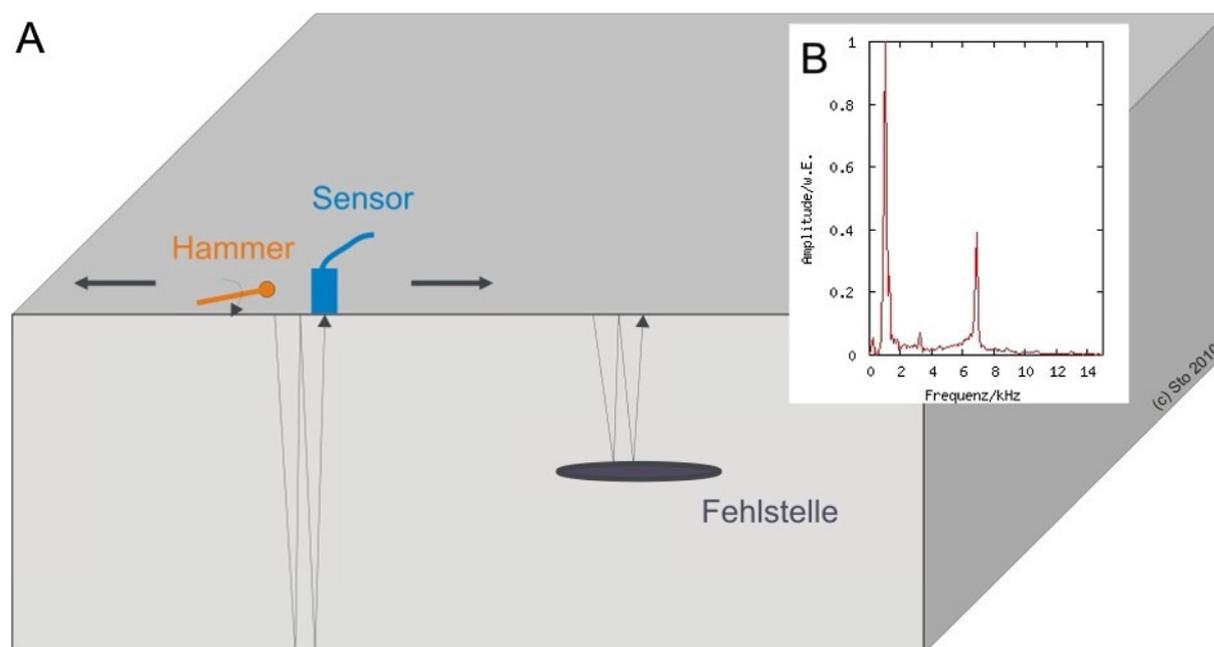


Abbildung 9-6 A: Schematischer Aufbau des Impakt-Echo-Verfahrens, die Vielfachreflexionen des mechanischen Impulses enthalten je nach Reflektorlage verschiedene Frequenzanteile, B: Typische Darstellung der Zeitsignale im Frequenzbereich durch Umwandlung mittels Fourier-Transformation

Ändert sich im Bauteil die akustische Impedanz, beispielsweise an der Bauteilrückwand oder der Grenzfläche zu einer anderen Schicht des Aufbaus, so kommt es zur Reflexion der Welle. Die Mehrfachechos entstehen durch die weiteren Reflexionen der Schallwelle zwischen beiden parallel verlaufenden Grenzflächen. Großformatige Defekte können sich beispielsweise indirekt durch das Ausbleiben eines Rückwandsignals durch Abschattung zeigen.

Im Gegensatz zu der bei Echoverfahren üblichen Auswertung der Laufzeiten von Reflexionen werden bei diesem Verfahren die Zeitsignale mit Hilfe der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich übertragen und ausgewertet.

Dominante Frequenzen infolge der Vielfachreflexionen der Wellen erscheinen als Anzeige im Frequenzspektrum (Frequenzbereich von ca. 2 bis 40 kHz). Der charakteristischen Frequenz  $f$ , an der diese Spitzen auftreten, kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen  $v$  die Tiefe des Reflektors  $d$  über die Beziehung  $d = v/(2 \cdot f)$  zugeordnet werden (siehe Abbildung 9-6).

Eine automatisierte Anwendung von Impakt-Echo mit scannenden Systemen am Beton wird beispielsweise in [Algernon2005] beschrieben.

### **9.2.5 Optische Verfahren**

Eine einfache Sichtprüfung durch einen sachverständigen Prüfer ist die derzeit am meisten angewendete Art der Prüfung und wird es auch zukünftig sein.

Durch die heutigen Möglichkeiten der digitalen Bildspeicherung sind aber auch großflächige Dokumentationen automatisiert möglich:

Eine Möglichkeit das oberflächige Rissbild zu dokumentieren und zu analysieren, ist die Oberfläche mit leistungsfähigen Zeilenkameras abzulichten und die sichtbaren Fehlstellen bei der späteren Auswertung mithilfe einer entsprechenden Software zu vermessen.

Eine Rissgrößenvermessung nach Breite und Länge ist Stand der Technik, eine Risstiefenbestimmung ist mit optischen Verfahren nicht möglich, sie ist derzeit Stand verschiedener Forschungsarbeiten im Bereich Ultraschall.

## 9.3 Nicht bzw. schwer automatisierbare ZfP-Verfahren

Die aktive Infrarot-Thermographie ist aufgrund ihres Zeitbedarfs für eine großflächige Anwendung schwer automatisierbar. Die Automatisierung der Radiografie für einfache Untersuchungen im Bauwesen scheitert schlichtweg an sicherheitstechnischen Auflagen im Sinne des Strahlenschutzes. Alle bildgebenden, optischen Verfahren sind prinzipiell auch automatisierbar. Hierzu existieren für einzelne Verfahren kommerzielle, softwarebasierte Systeme.

### 9.3.1 Infrarot-Thermografie

Als Infrarot-Thermografie werden berührungslose Messverfahren zur bildgebenden Darstellung von Temperaturverteilungen und -änderungen an Oberflächen von Objekten aufgrund der vom Objekt ausgehenden Wärmestrahlung bezeichnet. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen passiver und aktiver Thermografie.

Die passive Infrarot-Thermografie wird in der Bauphysik zur Ortung von Kälte- bzw. Wärmebrücken in Bauwerken sowie zur qualitativen Beurteilung von Wärmedämmung verwendet. Dieser seit Jahren bewährte Einsatzbereich wird hier nicht weiter vertieft.

Eine Weiterentwicklung der passiven Infrarot-Thermografie ist die aktive Methode. Die aktive Thermografie eignet sich zur Ortung von Fehlstellen in oberflächennahen Bereichen. Ein zu untersuchendes Objekt wird durch eine Strahlungswärmequelle erwärmt, daraufhin bildet sich ein Temperaturgradient der Oberfläche zu seiner Umgebung. Das Abkühlungsverhalten auf der Oberfläche mit einer im Infrarotbereich empfindlichen Kamera in vorgegebenen Zeitintervallen aufgezeichnet.

Die Kamera (Abbildung 9-7) nimmt dabei die von der Oberfläche emittierte Strahlung auf. In der Brennebene befindet sich ein Diodenarray mit Detektoren, von denen jeder die Strahlungsintensität an einem bestimmten Ort in einen messbaren Strom umwandelt. In der Kamera oder im Auswertungsprogramm werden diese Ströme über eine Kalibrierung in Temperaturwerte umgerechnet. Diese können dann zusammengesetzt auf einem Monitor als Schwarzweiß- oder Falschfarbenbilder (Thermogramme) ausgegeben werden. Gleichzeitig werden die thermischen Bilddaten in Echtzeit auf einen Computer übertragen und dort gespeichert. Nach der Aufzeichnung des Abkühlungsvorganges können die thermischen Daten mit Hilfe geeigneter Software analysiert werden.

Da Fehlstellen in der Regel von der Umgebung abweichende thermische Eigenschaften wie Dichte, spezifische Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit aufweisen, können durch höhere oder niedrigere Temperaturen auf der Oberfläche während des Abkühlungsvorganges nachgewiesen werden. In Beton können Fehlstellen bis zu einer Tiefe von 10 cm nachgewiesen werden [Maierhofer2004].

Ein großer Nachteil des Verfahrens sind die unter Umständen sehr langen Erwärmungszeiten von unter Umständen bis zu 60 Minuten, die je nach erwarteter Tiefe einer Fehlstelle aufgewendet werden müssen. Für die Untersuchung der Güte des Haftverbundes von CFK

Laminaten auf Beton können aber auch 15 Sekunden ausreichend sein [Maierhofer2004]. Dieser Umstand erschwert eine großflächige Automatisierung des Verfahrens.

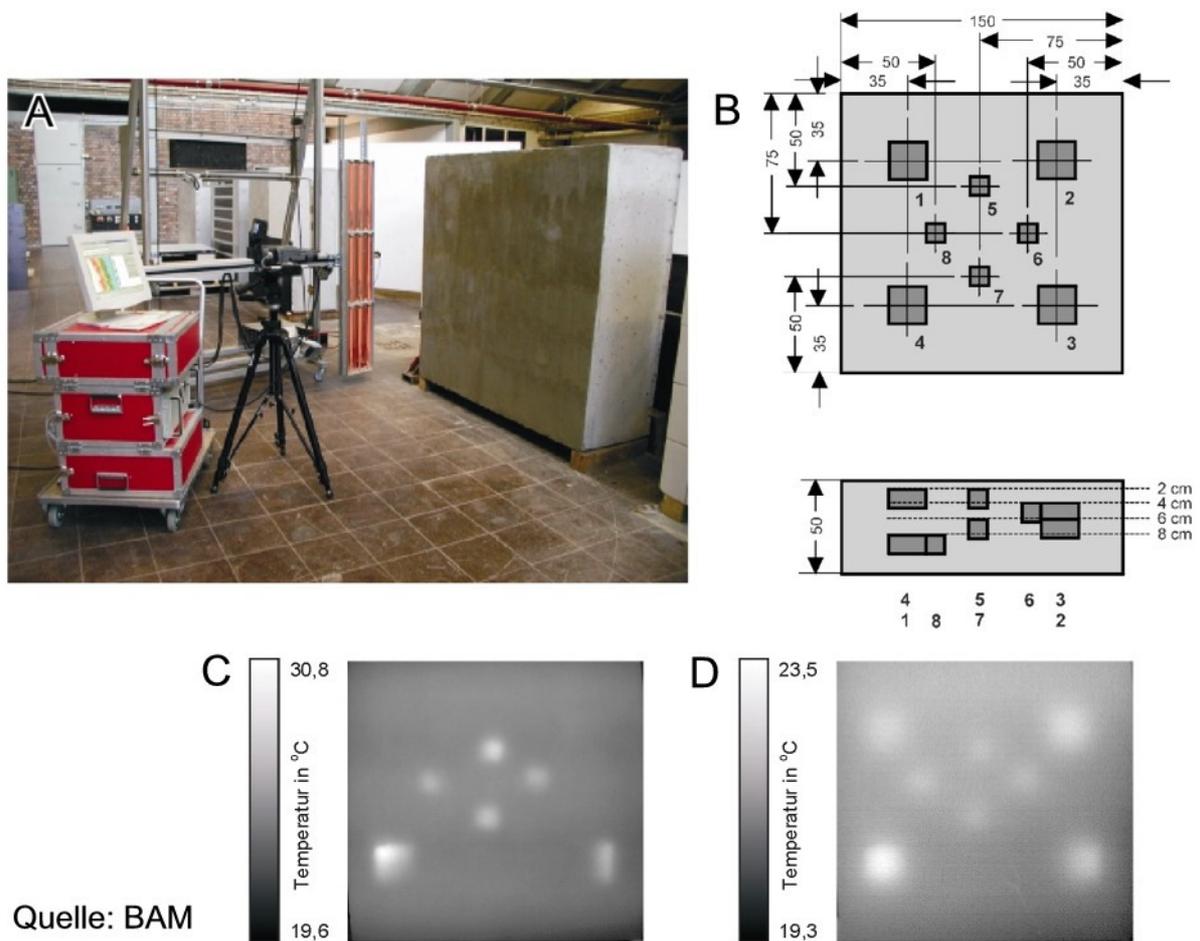


Abbildung 9-7 A: Thermografiekamera mit Erwärmungseinheit und Betonprobekörper mit künstlichen Fehlstellen, B: Schematische Darstellung des Probekörpers, C: Thermogramm des Probekörpers nach 10 min Erwärmung und nach 9 min Abkühlung, die oberflächennahe Fehlstellen werden kontrastreich abgebildet, D: nach 58 min werden auch tiefer liegende Fehlstellen abgebildet [Maierhofer2004].

### 9.3.2 Radiografie

Ionisierende Primärstrahlung (Röntgen- oder Gammastrahlung) wird im Bauwesen häufig zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen mit besonders hoher Standsicherheitsrelevanz, die eine sehr detaillierte Darstellung des Untersuchungsbereiches erfordern, eingesetzt. Insbesondere wenn andere zerstörungsfreie Prüfverfahren aufgrund der Randbedingungen nicht einsetzbar sind, wird der Mehraufwand, der durch die gebotene Vorsicht und die Notwendigkeit der Einhaltung der Strahlenschutzbestimmungen entsteht, in Kauf genommen.

Die Auswertung radiografischer Messungen basiert auf den unterschiedlichen Absorptionsgraden, die durch Dichte-, Material- und Materialdickenunterschiede im Bauteil entstehen.

Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass die Absorption elektromagnetischer Strahlung im Röntgen- und Gammabereich praktisch nur von der Bauteildicke und der Dichte des Materials abhängt und deshalb Beton, Bewehrung und Fehlstellen deutlich voneinander unterschieden werden können.

Als Strahlungsquelle können Röntgenröhren oder Radionuklide (beispielsweise Kobalt  $^{60}\text{Co}$  oder Iridium  $^{192}\text{Ir}$ ) verwendet werden. Als Bildaufnahmesysteme dienen radiografische Filme, digitale Speicherfolien, Fluoroskope, Bildverstärker oder elektronische Halbleiterdetektoren. Die hohe Durchdringungsfähigkeit der Strahlung durch die meisten Werkstoffe führt zu einer Schwärzung des Films oder entsprechenden Änderungen der Analog- oder Digitalsignale in elektronischen Detektionssystemen. Die Wahl der Strahlungsquelle richtet sich im Wesentlichen nach den zu durchstrahlenden Bauteildicken. Der nutzbare Messbereich liegt für  $^{60}\text{Co}$  zwischen 20 cm und 60 cm, für  $^{192}\text{Ir}$  bis 35 cm und für Röntgenstrahler bis zu 30 cm Bauteildicke.

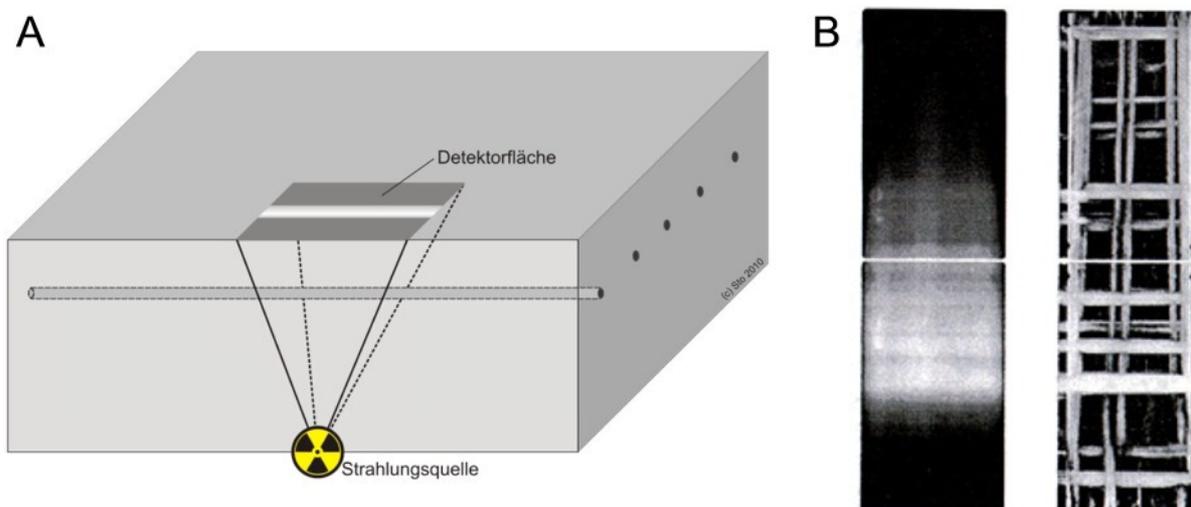


Abbildung 9-8 A: Prinzipieller Aufbau einer radiografischen Messung mit Strahlungsquelle und Detektorfläche beidseits des zu untersuchenden Bauteils, B: gemessene (links) und gefilterte (rechts) Projektion eines Stahlbetonbauteils. Für die Filterung werden strukturorientierte Algorithmen eingesetzt, die nur horizontale und/oder vertikale Strukturen hervorheben (Quelle: [BAM2005]).

Für die Positionierung von Strahlungsquelle und Bildaufnahmesystem ist ein zweiseitiger Zugang zu dem zu untersuchenden Bauteil erforderlich (Transmissionsanordnung).

Zur genaueren Bestimmung der geometrischen Abmaße von Einbauteilen können stereoradiografische Rekonstruktionsverfahren [Redmer2003] eingesetzt werden. Dazu sind mindestens zwei oder mehr Aufnahmen aus unterschiedlichen Einstrahlrichtungen (Mehrwinkel-Technik) erforderlich. Die Rekonstruktion des Einbauteils kann durch eine grafische oder computergestützte Rückprojektionstechnik erfolgen. Das rekonstruierte Bild ermöglicht die quantitative Vermessung der Tiefe und des Durchmessers von metallischen Einbauteilen.

## 9.4 Zerstörungsarme und zerstörende Verfahren

Zerstörende Verfahren bleiben in dieser Arbeit unberücksichtigt, da die angewendeten Verfahren meist auf der Untersuchung von dem Bauteil entnommenen Bohrkernen beruhen und somit nicht oder nur mit unrealistischem Aufwand für große Flächen automatisierbar sind. Einen umfassenden Überblick mit der Möglichkeit zur Online-Recherche gibt das ZfPBau-Kompendium [BAM2005].

Der folgende Abschnitt befasst sich aber nicht nur der Vollständigkeit halber mit dem für Parkhäuser wichtigen Aspekt der Bewertung des Zustands und dem Schutz der Oberflächen, sondern zeigt auf, dass im Bereich zerstörungsfreier Prüfungen der Oberflächenschutzsysteme als Teil einer Qualitätssicherung bei oder nach der Fertigung noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

### 9.4.1 Verfahren zur Bewertung von Oberflächenschutzsystemen

An ein Oberflächenschutzsystem (OS-System) werden verschiedene Anforderungen wie Witterungsbeständigkeit, Diffusionswiderstand gegen CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, Rissüberbrückungsfähigkeit, Verschleißwiderstand und chemische Belastbarkeit gestellt. Der gleichnamige Begriff der Sollsichtdicke einer Beschichtung hat im Korrosions- und Betonschutz eine unterschiedliche Bedeutung. Deshalb ist es unabdingbar, nach dem jeweiligen Anwendungsgebiet und Funktion des OS-Systems, eine Quantifizierung der Schichtdicke vorzunehmen [Herdecke2000].

Um die Schichtdicke messtechnisch erfassen zu können, muss man das Herstellungsverfahren verstehen, denn bei Betonoberflächen beeinflussen mehrere unabhängig voneinander wirkende Faktoren das Beschichtungsergebnis. Dabei spielt bereits die Art des Applikationsverfahrens, ob Airless-Spritzen, Pinsel-, Roll- oder Zahnspachtelapplikation, für die Schwankungsbreite der Schichtdicke eine entscheidende Rolle, unabhängig vom verwendeten Beschichtungsmaterial. Ebenso ist die Rauheit des zu beschichtenden Untergrundes für das gleichmäßige Aufbringen der Schichtdicke ein wichtiger Parameter. So ist die zu beschichtende effektive Fläche bei rauen Bauteilen größer, als bei glatten Flächen gleicher Abmessung. Um die Rauheit und Griffigkeit der Beschichtung zu erhöhen wird zusätzlich Quarzsand dem Polymer zugemischt.

Auf Bodenflächen erfolgt das Aufbringen von Beschichtungen grundlegend mit Zahnleisten, wobei das Alter oder der Abnutzungsgrad der Zahnleiste für das Erzielen der gewünschten Schichtdicken berücksichtigt werden muss. Die Hersteller machen für ihre Beschichtungssysteme genaue Angaben zu Mengen und Verfahren, doch letztendlich ist, wie bei vielen gängigen Applikationsverfahren, das fachmännische handwerkliche Können des Endanwenders mit entscheidend. Die Beschichtungssysteme werden wie in [DBV2005] beschrieben je nach Anwendung in OS-Systeme eingeteilt.

Als Beispiel sieht ein Schichtaufbau für eine rissüberbrückende Beschichtung eines OS 11 nach [DIN 1045-1/2005] folgendermaßen aus:

- Grundieren und kratzspachteln mit lösemittelfreiem Epoxydharz
- Verfüllen mit einem lösemittelfreien, pigmentierten, zweikomponentigem, hochelastischen Polyurethanharz
- Aufbringen einer verschleißfesten, mit mindestens 20 % vorgefüllter elastischer Oberflächenschutzschicht (Polyurethan), Mindestschichtdicke 4 mm
- Deckversiegelung mit lösemittelfreiem, pigmentischem, elastischem Beschichtungssystem (Polyurethan)
- Ggf. Abstreuerung und erweiterte Deckenversiegelung

Die Messung der Dicke einer auf Beton applizierten Beschichtung ist somit sehr schwierig. Während man auf metallischen Untergründen die Dicke von Oberflächenschutzschichten magnetinduktiv oder nach dem Wirbelstromprinzip störungsfrei messen kann, ist dies auf mineralischen Untergründen wie Beton derzeit praktisch nur durch zerstörende Messmethoden möglich. Beide Rauheiten (der des Untergrundes und der der Beschichtung) erschweren es zudem einen gleichmäßigen Bezugshorizont zur Bestimmung der Schichtdicke festzulegen (Abbildung 9-9 C), in der Praxis werden deshalb viele stichprobenartige Messungen durchgeführt und deren Ergebnisse gemittelt.

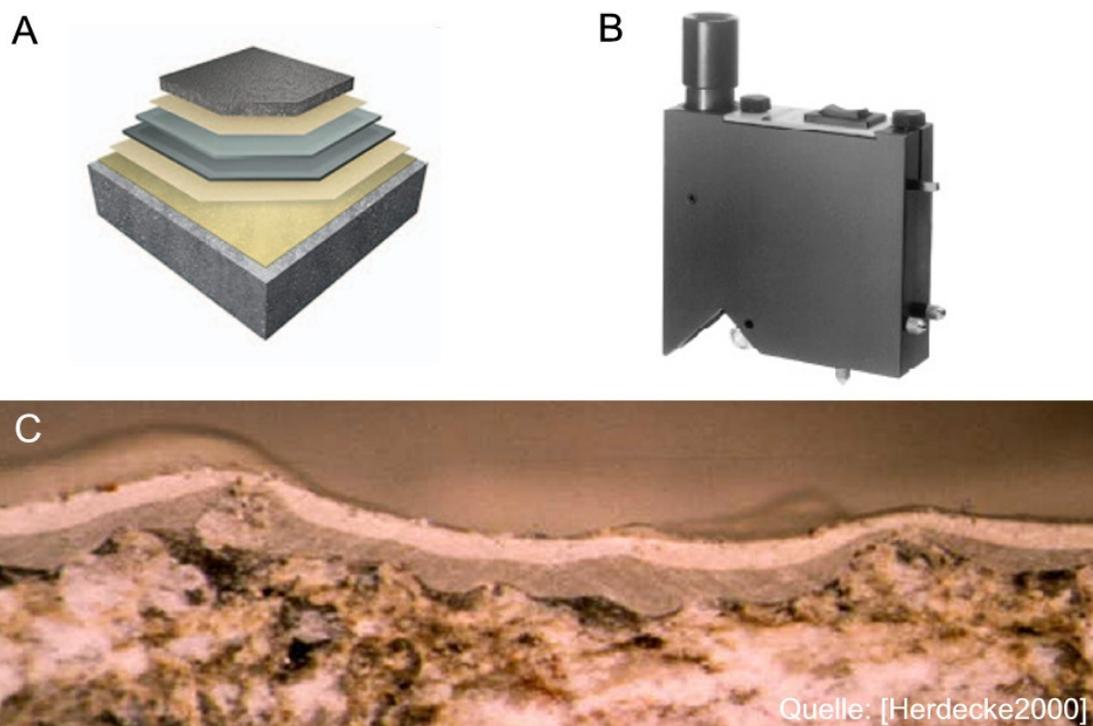


Abbildung 9-9 A: Sollsichtaufbau eines OS-Systems, B: Keilschnittgerät zur zerstörungsfreien Bestimmung von Schichtdicken, C: vergrößerter Vertikalschnitt durch ein beschichtetes Betonbauteil, die Beschichtung weist sehr viele unterschiedliche Einzelschichtdicken im Bereich von einem bis 3 mm auf.

Durch Anwendung des sog. Rossmann – Messkammes oder der Rollfelge kann die Bestimmung der Schichtdicke noch im nassen Zustand ausgeführt werden, also bereits während der Verarbeitung.

Die am häufigsten angewendete Methode zur Bestimmung der Schichtdicken ist das Keilschnittverfahren (engl. Paint Inspection Gauge). Die Anwendung bedarf umfangreicher Erfahrung und Messpraxis. Stichprobenartig verteilt wird hierzu die zu untersuchende Fläche mit einer Hartmetallschneide durch die zu prüfende Schicht unter vorgegebenem Winkel bis auf den Untergrund eingeritzt (Abbildung 9-9 B). Der dadurch entstehende keilförmige Schnitt macht das Schichtsystem sichtbar. Die Schichtdicke wird aus der mit einem Messmikroskop bestimmten Schnittflankenprojektion und dem Schnittwinkel berechnet. Die unvermeidbare örtliche Zerstörung der Beschichtung hält sich in Grenzen. Die erzeugten Keilschnitte können in der Regel mit geringem Aufwand und ohne Funktionsbeeinträchtigung nachgebessert werden. Bei größeren Schichten kann die Dicke mit einer Schieblehre mit aufgesetzter Messuhr oder einer Mikrometerschraube an einem zuvor entnommenen Span gemessen werden.

Beide Verfahren sind nicht für eine automatisierte zerstörungsfreie Zustandserfassung geeignet. Ein erster Ansatz wird in [Garbacz2003] mit der Anwendung von Luftultraschall verfolgt.

## 9.5 Anpassung und Erweiterung von Standardmessgeräten

Anders als in der industriellen Mess- und Regelungstechnik existieren in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen keine Standards für Datenübertragungen oder Datenformate, um mit einem Messgerät kommunizieren und dessen Daten elektronisch mit einem Rechner zeitnah auslesen zu können.

Im ungünstigsten Fall existiert keine oder nur eine nicht offengelegte Schnittstelle in einem proprietären Format, welches meist nur dafür vorgesehen ist, mit einer herstellerspezifischen Software komplette Datensätze einer Prüfung auszulesen. Zeitnahe Messungen, bei denen Einzelwerte am jeweiligen Messpunkt sofort ausgegeben werden, sind mit diesen Geräten nicht möglich. Ohne die Bereitschaft zur Mithilfe des jeweiligen Herstellers seine Soft- oder Hardware zu modifizieren, gibt es somit keine Möglichkeit, ein solches Gerät automatisiert zu verwenden.

Auch bei Geräten, die über eine gut dokumentierte Schnittstelle verfügen, ergeben sich weitere Fragen; beispielsweise nach dem minimal möglichen Intervall zwischen der Bereitstellung neuer Messwerte oder Verzögerungszeiten, die durch eine interne Weiterverarbeitung im Messgerät zwischen der Aufnahme eines Messwertes und der Weitergabe an die Schnittstelle entstehen. Im Unterschied zu Handmessungen kann durch zu große Verzögerungszeiten bei einer automatisierten Messung die Zuordnung zum Messort aufgrund der kontinuierlichen Fortbewegung des Sensorkopfes ungenau sein.

Im einfachsten Fall fungieren Messgeräte als analoge Geber, die eine Gleichspannung proportional dem zu erfassenden Messwert ausgeben. Diese kann zwar einfach mit Analog/Digital-Wandlern aufgenommen werden. Für eine schnelle und fehlerfreie Messwertübergabe ist diese Art der Kommunikation jedoch meist zu träge und ungenau. Eine bidirektionale Kommunikation ist damit nicht möglich.

Vorzugsweise kommen daher moderne, digitale Schnittstellen zum Einsatz. Je nach Geschwindigkeitsanforderung und Komplexität reicht das Spektrum von einfachen seriellen Schnittstellen (RS232, RS485) über die schnelleren USB-(Universeller Serieller Bus) oder Firewire-Verbindungen bis hin zu Ethernet- und Glasfaserverbindungen.

Auch drahtlose Techniken wie Bluetooth oder WLAN finden sich in modernen Geräten. Hier ist aber aufgrund eines erhöhten Aufkommens von Zusatzdaten (Overhead), die zur Übermittlung notwendig sind, je nach Datenvolumen ggf. mit Verzögerungen in der Datenübertragung zu rechnen, die eine Positionszuordnung unter Umständen erschwert.

Eine einheitliche, gleichzeitige Aufnahme von Messwerten bei Verwendung vieler unterschiedlicher Messgeräte wird zudem durch die Verschiedenartigkeit der verwendeten (meist paketorientierten) Protokolle auf diesen Schnittstellen erschwert.

Ungefähr 90 % der im ZfPBau-Kompendium der BAM [BAM2005] enthaltenen Messgeräte verfügen über keine oder keine offengelegte Schnittstelle.

### 9.5.1 Voruntersuchungen

Für einige der ausgewählten Verfahren liegen durch langjährige Erfahrungen in der Entwicklung von scannenden Systemen Erkenntnisse über deren Automatisierbarkeit vor [Stoppel2007]. Hierzu zählen Ultraschall (Abbildung 9-10A), Impakt-Echo und Radar. Die Voruntersuchungen für diese Gerätetypen beschränken sich deshalb auf ein Mindestmaß, beispielsweise auf die Auswahl geeigneter Antennen und auf die Konstruktion geeigneter Halterungen.

Um die Möglichkeit der Automatisierbarkeit der Potentialfeld- und der Betondeckungsmessung mit dem Wirbelstrom-Verfahren zu untersuchen, wurde an der BAM eine Diplomarbeit zu den notwendigen Randbedingungen der Verfahren angefertigt [Eckhold2008].

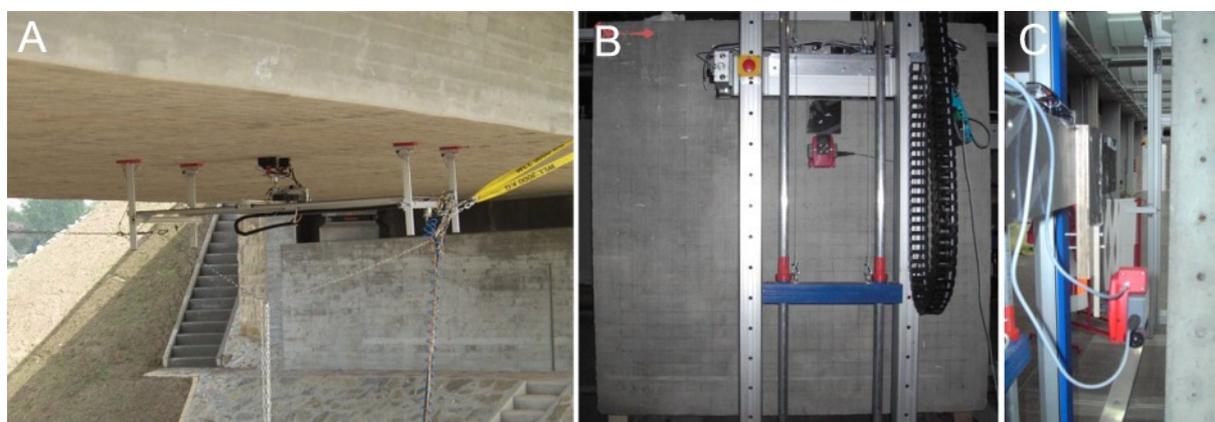


Abbildung 9-10 A: Bauwerksscanner mit Vakuumbefestigungssystem und Ultraschallprüfköpfen bei der Untersuchung einer Brückenkonstruktion, B: BAM Prüfstand zur scannenden Untersuchung von Betonprobekörpern mit Wirbelstromprüfkopf, C: Detailansicht Wirbelstromprüfkopf und Betonprobekörper mit Variation der Betondeckung der Bewehrung

In der Diplomarbeit wurde als erste Aufgabe die Detektionssicherheit von Bewehrungsstäben mit Variation des Stabdurchmessers und der Betondeckung in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit des Prüfkopfes über der Oberfläche ermittelt (Abbildung 9-10B). Der Autor kommt über empirische Versuche zu dem Schluss, dass nur bis zu einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 10 cm/s mit den derzeit vorhandenen Geräten eine sichere, reproduzierbare Detektion der Bewehrungsstäbe möglich ist, wobei eine Steigerung der Bewegungsgeschwindigkeit aber wünschenswert und physikalisch möglich wäre.

Der zweite Aufgabenbereich der Diplomarbeit beschäftigte sich mit der Untersuchung der Potentialdifferenzmessung bei unterschiedlicher Ankopplung der Referenzelektrode an das Bauwerk. Als dritter Aufgabenbereich rundete eine Literaturrecherche zum Thema zerstörungsfreie Messung der Beschichtungsdicke von Betonflächen die Diplomarbeit ab, mit dem Ergebnis, dass keine kommerziell erhältlichen Messgeräte für diese Prüfaufgabe verfügbar sind; allenfalls wird ein erster Ansatz in [Garbacz2003] auf der Basis von Luftultraschall beschrieben.

Die Handhabung der Mikrowellenfeuchtesensoren wurde in zahlreichen Versuchsreihen an Labortestkörpern und auch in Bauwerksuntersuchungen mit vergleichenden Messungen mit anderen Feuchtesensoren im Rahmen des CHEF-Projektes [CHEF2009], das sich mit der Entwicklung von ZfP-Verfahren zur Feuchtemessung an historischen Gebäuden befasste, untersucht.

### **9.5.2 Hardwareintegration**

Um Sensorköpfe an Erkundungsrobotern zu befestigen, wird meist eine starre, unveränderliche Konstruktion gewählt, da diese im jeweiligen Anwendungsbereich nicht weiter verändert oder angepasst werden muss. Für ein System, dessen Sensoren variabel eingesetzt und frei kombiniert werden sollen, ist eine solche Konstruktion nicht flexibel genug. Die im Folgenden beschriebenen Anpassungen wurden im Rahmen des BetoScan-Projekts entwickelt und sind leicht auf andere Systeme übertragbar.

Für die Vielzahl von Einsatz- und Kombinationsmöglichkeiten der Verfahren eines Multisensoriksystems wurde erstmals ein variables, modulares, frei bestückbares System konstruiert, das es erlaubt, alle Sensoren entsprechend der Prüfaufgabe einzusetzen.

Um alle Sensorköpfe schnell und werkzeuglos wechseln zu können, wurde eine einheitliche Sensorhalterung konzipiert (Abbildung 9-11 A). Diese Sensorhalterungen können an variablen Aufhängungspunkten einer Roboterplattform eingehängt werden und durch eine Fortsetzung der Aufnahme an der Sensorhalterung auch kaskadiert werden, so dass jeder Sensor an einem beliebigen Rasterpunkt (Positionen 1 bis 6, siehe Abbildung 9-11 B) installiert werden kann. Die Positionen 7 bis 9 erlauben es durch modulare Nutenschienen weitere Sensoren frei zu positionieren. Die Offsetpositionen der Sensorhalterung zum Koordinatenursprung des Roboters sind in der Messwerterfassungssoftware hinterlegt, auf diese Weise muss der Anwender die Positionen nicht selbst vermessen.

Durch eine hohe Fertigungsgenauigkeit wurde eine hohe Steifigkeit und gute Kraftschlüssigkeit der Sensorhalterungen erreicht, damit die Sensorhalterungen auch für den Betrieb mit dem pneumatischen Andrucksystem, das per Hubzylinder Sensoren an die zu untersuchende Oberfläche andrücken kann, geeignet sind.

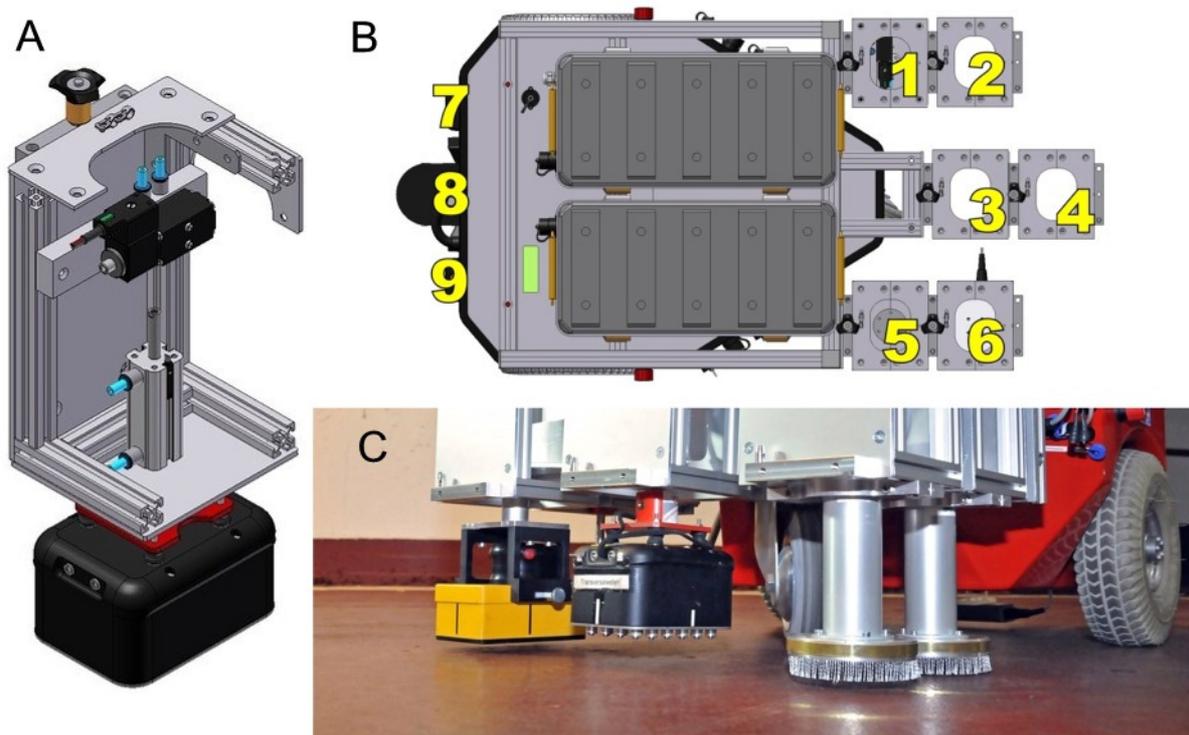


Abbildung 9-11 A: Schnitt durch den Entwurf der Standard-Sensorhalterung, hier mit eingebautem pneumatischem Hubzylinder und Ultraschall-Messkopf; B: Draufsicht auf die Roboter-Plattform mit modularer Befestigungsmöglichkeit der Sensorgehäuse an den Positionen 1 bis 6 (gelb), C: Sensorrahmen an der Roboterplattform mit Radarantenne, Ultraschallmesskopf und zwei Mikrowellen-Feuchtesensoren (v.l.nr.)

Für jeden Sensor wurde eine entsprechende Adaptierung an die Sensorhalterung vorgesehen.

Damit das **Wirbelstromverfahren** (vgl. Kapitel 2.2.1) automatisiert verwendet werden kann, wurde die Halterung des Wirbelstromkopfes inkl. der Befestigungsschrauben aus Plexiglas gefertigt. Eine metallische Halterung würde den Messwert verfälschen. Es ist ein großer Vorteil des Verfahrens, dass jegliches nichtleitendes Material zwischen Sensorkopf und Stahl keinerlei Einfluss auf das Messergebnis hat. Auch der Feuchtegehalt des Betons spielt keine Rolle, da sich keine Wirbelströme ausbilden können.

Anders als bei manuellen Messungen darf der Messkopf nicht direkt über die Betonoberfläche gezogen werden, da durch die Rauheiten des Betons ein zu großer Verschleiß zu erwarten wäre. Der eingestellte Abstand zwischen Sensorkopf und Betonoberfläche muss vermessen werden, um ihn in den tatsächlichen Betondeckungswert einrechnen zu können.

Da **Radarantennen** je nach Frequenzbereich und Hersteller verschiedene Abmessungen aufweisen, wurde erstmals eine universelle Halterung konzipiert, an der alle Antennen einer Baureihe befestigt werden können. Die Halterung ist höhenverstellbar, und zur Änderung der Polarisationsrichtung in Fahrrichtung kann die Halterung um bis zu 270° gedreht werden. Die

Höhenverstellung ist notwendig, um einen direkten Kontakt der Antenne zur Betonoberfläche und damit einen Verschleiß durch Abrieb zu vermeiden. Der Luftspalt zwischen Antenne und Betonoberfläche sollte aber auf ein notwendiges Minimum (kleiner als ein Viertel der benutzten Wellenlänge) eingestellt werden, da sonst durch Reflexionen der einkoppelnden Impulse an der Oberfläche des Betons zu wenig Energie in das Bauteil eingeleitet würde.

Die Verbindung zwischen Sender- und Empfängereinheit und der Antenne eines Radargerätes erfolgt meist mit sehr massiven, herstellerepezifischen Kabeln, da die richtige Anpassung hinsichtlich des Wellenwiderstandes, der Länge und der Schirmung gegeben sein muss. Eine Kürzung der hinderlichen Überlängen der Kabel ist somit nicht möglich.

Auch die Halterungen für die **Mikrowellenfeuchtesensoren** sind höhenverstellbar, um einen minimalen Abstand zu der zu untersuchenden Betonoberfläche herstellen zu können. Zudem wurde am äußeren Rand eine leitfähige Bürstendichtung angebracht, um den Antennenbereich von externen Störungen besser abzuschirmen. Um eine Tiefenabhängigkeit der Feuchte bestimmen zu können, wurden zwei Systeme mit unterschiedlichen Eindringtiefen, 4 cm für den oberflächennahen Bereich und 20 cm für den tieferliegenden Bereich, parallel eingesetzt.

Für den **Ultraschallkopf** wurde das in der BAM entwickelte und ausführlich getestete Pneumatiksystem in eine der Sensorhalterungen eingebaut [Stoppel2007]. Eine Andruckmöglichkeit mit einem elektromechanischen Stellzylinder wurde nach ersten Tests wieder verworfen: Das Gewicht des Stellzylinders und die Stromaufnahme sind zu hoch, ebenso der Aufwand, um den variablen Hub bei unebenen Untergründen mit konstanter Andruckkraft elektronisch zu regeln.

Alternativ musste aber für die sonst nur stationär an großen Kompressoren betriebenen Druckzylinder ein Kleinstkompressor mit Kleinspannungsversorgung, geringem Stromverbrauch und niedrigem Eigengewicht gefunden werden, der über 2 bar Druck erzeugen kann. Es wird eine Membranpumpe mit 2,5 bar Nennleistung bei 24 V DC bei nur 1 A Stromaufnahme eingesetzt. Mit ihr können je nach Anwendungsart und Hubzylindertyp bis zu drei Hubzylinder gleichzeitig betrieben werden. Die Pumpe wurde in eine (separate) Sensorhalterung integriert, um Überkopplungen von Vibrationen, die nicht von den verwendeten Gummihalterungen bedämpft werden können, auf die akustisch empfindlichen Sensorköpfe zu vermeiden. Zudem kann die Membranpumpe per Software ein- und ausgeschaltet werden, wodurch neben einem Dauerbetrieb auch ein Intervallmodus möglich ist, bei dem nur während der Fahrt der Roboterplattform der benötigte Druck aufgebaut wird. Die Pumpe kann dann während der Messung zur Vermeidung von mechanischen Vibrationen abgeschaltet werden.

Für die **Potentialfeldmessung** musste zur kontinuierlichen Bewässerung des Elektrodenrades ein zusätzlicher Wassertank mit Tropffunktion integriert werden, um bei großflächigen Anwendungen gleichmäßige Bedingungen zu garantieren. Für den Anschluss an die Bewehrung können lange Schleppkabel eingesetzt werden; hier ist auf einen

ausreichenden Querschnitt und hohe Robustheit zu achten. Eine Aufrollautomatik für das Kabel kann sinnvoll sein, ist bei mäanderförmiger Fahrweise aber nicht unbedingt erforderlich.

Eine wichtige Maßnahme bei der Potentialfeldmessung ist es, eine Radelektrode möglichst gleichmäßig und langsam über die zu untersuchende Fläche zu führen. Gleichzeitig sollte die Messung zeitnah über die gesamte Fläche ausgeführt werden, um gleichbleibende Bedingungen beibehalten zu können. Unterschiedliche Prüfer und menschliche Einflussfaktoren (Konzentration, notwendige Pausen etc.) können unter Umständen zu Messabweichungen führen. Gerade hier liegt die Stärke eines automatisierten Systems, mit dem monotone Handlungen wie großflächige Messungen kontinuierlich mit gleichbleibender Qualität über lange Zeiträume und ohne Pausen ausgeführt werden kann.

Im Falle der Potentialfeldmessung mit einer Radelektrode kann diese mit einer einstellbaren, ganz exakt geregelten, angepassten Fahrgeschwindigkeit bewegt werden.

Folgende Anpassungen wurden am **elektrischen System** vorgenommen:

Für die elektrische Verbindung zum Sensorikrechner wurde ein einheitliches wasserdichtes Steckverbindersystem benutzt. Zur Sicherheit gegen unabsichtliche Vertauschung der Steckverbinder sind diese mit einer unterschiedlichen Anzahl von Polen bestückt. Bei gleichartigen Steckverbindern wurde die Belegung der Pole zudem durchgängig einheitlich ausgeführt, um ggf. ähnliche Geräte anschließen zu können. Beispielweise wurden Geräte mit USB-Anschluss mit sechspoligen Steckverbindern ausgeführt; neben Masse, 5 V und den beiden Datenleitungen wurden noch 12 V und 24 V von der Bordspannung der Roboterplattform hinzugefügt. Zusätzlich kann so über die Datensteckverbinder jedem Sensor eine externe Spannung als Spannungsversorgung zugeführt werden. Auf diese Weise kann ein Dauerbetrieb der Plattform unabhängig von Spannungsversorgungen der Einzelsensoren realisiert und sichergestellt werden.

Die Steuerung des Gesamtssystems erfolgt über ein Notebook, dessen zusätzliche Batterieversorgung sicherstellt, dass im Falle eines Stromausfalls die Messung ungehindert fortgesetzt werden kann. Aus diesem Grund wurde auch der WLAN-Access-Point, über den die gesamte drahtlose Kommunikation zwischen Steuerung und Roboterplattform abgewickelt wird, mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung ausgestattet, die im Extremfall auch ohne verfügbares Stromnetz einen reinen Batteriebetrieb ermöglicht.

### 9.5.3 Softwareintegration und Datenübertragung

Ein Protokoll ist eine Vereinbarung, nach der Daten zwischen miteinander verbundenen Computern oder Prozessen ausgetauscht werden können. Den Ursprung der Daten bezeichnet man als Quelle und das Ziel als Senke.

Die Syntax ist in dieser Vereinbarung ein Satz von Regeln und Formaten, nach der das Kommunikationsverhalten zwischen diesen Instanzen bestimmt wird. Für unterschiedliche Kommunikationswege sind meist auch unterschiedliche Protokolle verantwortlich. Um diese in komplexen Strukturen abbilden zu können, werden Protokolle meist in Schichten

organisiert, bei denen jedes Protokoll durch ein höherwertiges Protokoll gekapselt wird. Zusammen bilden die so strukturierten Protokolle einen Protokollstapel in Anlehnung an das [ISO-OSI-Referenzmodell]. Ein Protokoll besteht typischerweise aus einer Kopfinformation („Header“), der Informationen über den Absender und Empfänger des Paketes („Adressen“), Typ und Länge des Paketes und ggf. eine Prüfsumme enthält, und den eigentlichen Nutzdaten beliebigen Typs [König2003].

Die wesentlichen Aufgaben eines Übertragungsprotokolls bestehen darin, einen zuverlässigen Verbindungsaufbau und ein verlässliches, fehlerfreies Zustellen der Nutzdaten zwischen den Übertragungspartnern sicherzustellen. Ggf. müssen nicht angekommene Pakete erneut verschickt werden.

In einem nahezu Echtzeitsystem kann eine fehlerhafte Datenübertragung Probleme aufwerfen, da unter Umständen die Zeit fehlt, Pakete neu anzufordern und diese erneut zu versenden. In diesem Fall bedient man sich der Möglichkeit, Prüfsummen in die Datenpakete einzufügen und diese beim Empfang zu verifizieren. Ein empfangenes Datenpaket mit ungültiger Prüfsumme wird in diesem Fall verworfen [König2003].

In der Informatik gibt es für eine Datenübertragung folgende grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale für die Art der Versendung von Datenpaketen:

Die ereignis- oder interruptgesteuerte Übertragung: Es werden nur Daten nach einem Ereignis von der Quelle zur Senke gesendet.

Das „Pushing“ von Daten: Es werden ständig (ggf. zyklisch) Daten unaufgefordert von der Quelle zur Senke gesendet.

Das „Pulling“ von Daten: Es werden sporadisch, aber gezielt Daten von der Senke aus der Quelle abgerufen.

Das „Polling“ von Daten: Es werden zyklisch Daten von der Senke aus der Quelle angefordert.

In der Industrieautomation ist es üblich, Sensoren und Aktoren mit einem einheitlichen Kommunikationsstandard auszurüsten. Typischerweise werden hocheffiziente, robuste Feldbussysteme mit einheitlichen standardisierten Protokollen verwendet [Feldbus]. Dies vereinfacht die Implementierung von Geräten unterschiedlicher Hersteller und führt dazu, dass große komplexe Systeme schnell in Betrieb genommen werden können.

Im Bereich der Messtechnik gibt es viele verschiedene Protokoll-Ansätze (Beispiele GPIB, HART, IEEE) sowie die einheitlichen proprietären Formate großer Hersteller, die versuchen, unterschiedliche Geräte über eine einheitliche Schnittstelle und Protokolle ansprechen zu können.

Es wäre zu begrüßen, wenn Hersteller im Bereich zerstörungsfreier Prüfgeräte auch Standards einführen oder sich der etablierten Standards der Industrieautomation bedienen würden.

Mechanismen die aufzeigen, wie die Datenübertragung und –speicherung für multisensorische Systeme ausgeführt werden sollten, werden in [Kurz2009] aufgezeigt.

Am meisten Probleme bereiten bei der Integration von Messgeräten unregelmäßig, d.h. unsynchronisiert eintreffende Daten „langsamer“ Geräte. An diesen orientiert sich auch die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit, da sonst die Gefahr einer Unterabtastung eintritt (siehe auch Kapitel 4.2). Bei Geräten, die ihren Messwert auf eine Abfrage (Request) hin liefern, sollte geprüft werden, ob der Messwert tatsächlich auch neu ermittelt wurde, oder nur der zuletzt ermittelte Wert wiederholt ausgegeben wird.

Für jeden Sensor, der für ein Multisensoriksystem bereitgestellt werden soll, ist es deshalb sinnvoll, das kleinstmögliche Datenerfassungsintervall, sofern dieses nicht per Datenblatt bekannt ist, messtechnisch zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurde für jeden Sensor, der über eine dokumentierte Schnittstelle verfügt, eine einfache separate Software unter Labview [Labview] erstellt. Damit konnte jeder Sensor einzeln auf Funktion, den Ablauf der Kommunikation und das kleinstmögliche Datenintervall geprüft werden. In einem zweiten Schritt wurde die gleichzeitige Verwendung von Sensoren durchgeführt, um Latenzzeiten durch gegenseitige Beeinflussung zu prüfen.

Für die Messgeräte für **Betonüberdeckung** und **Potentialfeldmessung** gab es am Markt kein kommerzielles Gerät mit einer offengelegten Schnittstelle. Als Lösung bot sich nur eine herstellerseitige Modifikation einer Firmware an, um den Messwert zeitnah an der seriellen Schnittstelle auszugeben.

Tabelle 8 fasst die Ergebnisse, für die verwendeten Schnittstellen und Protokolltypen zusammen.

Tabelle 8 Untersuchte Sensoren und deren Schnittstellen

Sensorname	Messgröße	Schnittstelle	Protokolltyp	Kleinstes Datenintervall $\Delta t$ [ms]
Hygrosens	Luftfeuchte und –temperatur	USB	Zyklisches Senden des Wertes vom Gerät (Pushing)	500
Profometer 5+	Betonüberdeckung	RS232	Zyklisches Senden des Wertes vom Gerät (Pushing)	200-300
Canin	Ruhepotential	RS232	Zyklisches Senden des Wertes vom Gerät (Pushing)	200-300
Moist PP+ RP	Volumenfeuchte	RS485 (Bus)	Getriggerte Abfrage (Pulling per Request)	10
A1220 Monolith	Dickenmessung, Ablösungen (Auswertung des A-Scan)	USB	Getriggerte Abfrage (Pulling per Request)	100
Mala ProEx	Dickenmessung, Bewehrungsortung (Auswertung des A-Scan)	Ethernet	Getriggerte Abfrage (Pulling per Request)	1

Die Geräte Hygrosens, Profometer 5+ und Canin senden zyklisch ihren ermittelten Messwert über die Schnittstelle, das sogenannte „Pushing“ (vgl. Kapitel 9.5.3).

Das Datenintervall des Hygrosens von 500 ms ist sehr groß. Da jedoch angenommen werden kann, dass bei Temperatur und Luftfeuchte selbst in Minutenintervallen keine sprunghaften Änderungen auftreten, ist dies mehr als ausreichend.

Als kritischer sind hier die Datenintervalle des Profometer 5+ und des Canin zu bewerten, da sie zum einen in unregelmäßigen Intervallen – je nach Zykluszeit für eine Messung – den Wert bereitstellen und zum anderen durch Datenintervalle von mehr als 200 ms die erreichbare Fahrgeschwindigkeit und damit die Flächenleistung pro Tag (siehe hierzu Abschnitt 4.2) deutlich verringern.

Die **Mikrowellenfeuchtemessgeräte** Moist PP und Moist RP stammen aus der industriellen Prozessmesstechnik. Die Geräte sind busfähig, d.h. mehrere Geräte sind über eine einzige Schnittstelle per eindeutiger Adresse ansprechbar. Die softwaregetriggerte Abfrage in sehr kurzen Intervallen bis zu 10 ms ermöglicht hohe Abtastgeschwindigkeiten.

Das **Ultraschallmessgerät** A1220 Monolith liefert ebenfalls per Abfrage seine Messdaten. Da bei diesem diskontinuierlichen Verfahren ein Stopp der Fahrbewegung zur Ankopplung des Sensors erforderlich ist, spielt das kleinstmögliche Datenintervall hierbei gegenüber der Gesamtstandzeit eine untergeordnete Rolle.

Entwicklungs- und systembedingt sind die Datenintervalle für **Radarmessungen** (Mala ProEx) sehr kurz. Bei diesen Geräten wurde seitens der Hersteller schon seit jeher schnelle Elektronik entwickelt, um große Datenmengen zu erfassen, weiterzuleiten und zwischenzuspeichern, da dies die Einsatzgebiete (Flugzeugortung, Georadar aus fahrenden Fahrzeugen) schon immer erfordert haben. Die Datenübertragung findet aufgrund der großen Datenmengen über Ethernet statt.

#### 9.5.4 Messwertabweichungen und Aussagesicherheit

Jeder Messwert ist fehlerbehaftet. Durch eine Vielzahl von externen wie internen Einflüssen auf ein Messsystem können Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem wahren Wert einer Messgröße auftreten; dies wird als sogenannte Messabweichung bezeichnet (veraltete Bezeichnung: Messfehler). Alle Abweichungen, deren Einfluss sich bei wiederholter Messung im Mittel nicht aufheben, werden als systematische Messabweichungen bezeichnet. Zufällige Messabweichungen (beispielsweise Rauschen) entstehen auch bei (theoretisch unendlich vielen) Wiederholungsmessungen; unter gleichen Bedingungen gleichen sie sich im Mittel aus [GUM2008].

Die folgenden Abschnitte beschreiben systematische und zufällige Abweichungen, die bei den jeweiligen Verfahren bekannt sind und auftreten können. **Hinzu kommen neue (systematische und zufällige) Abweichungen, die durch die Automatisierung der Verfahren entstehen können.**

Die Aussagesicherheit ist der Grad, mit der eine getroffene Aussage mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Sie wird in dieser Arbeit nicht als mathematische Größe behandelt.

In vielen Fällen wird eine Erhöhung der Aussagesicherheit einer Prüfaussage durch die Ermittlung von Randbedingungen durch andere Verfahren oder durch den Vergleich der Messergebnisse zweier unterschiedlicher Verfahren für die gleiche Messgröße gewonnen.

##### 9.5.4.1 Radarmessung

Der Einsatz des Impulsradar-Verfahrens wird durch Feuchtigkeit im Material oder allgemein durch stark leitfähige Materialien eingeschränkt oder teilweise verhindert, da die Dämpfung in diesen Fällen so stark ansteigt, dass kein reflektiertes Signal mehr detektiert werden kann. Die Ortung von Spanngliedern hinter schlaffer Bewehrung ist nur bis zu einem bestimmten Bewehrungsgrad möglich, da Abschattungseffekte die Reflexion eines Spanngliedes unter Umständen verhindern [Streicher2006].

Die Dämpfung der Amplitude einer Impulswelle im Beton nimmt mit steigender Frequenz zu, so dass die resultierende Eindringtiefe abnimmt. Da höhere Frequenzen aber eine bessere örtliche Auflösung von dicht benachbarten Objekten ermöglichen, muss hier zwischen Auflösungsvermögen und Eindringtiefe im jeweiligen Anwendungsfall bei der Auswahl von Antenne und Sendefrequenz abgewogen werden.

Bei der Ortung von linearen Reflektoren wie Bewehrungsstäben ist die Ausrichtung der Antennenpolarisation zum Reflektor bei der Überfahrt ein entscheidender Faktor, da bei

senkrecht zur Polarisationsrichtung bewegter Antenne die Reflexionssignale deutlich schwächer erscheinen als bei paralleler Bewegung dazu. Analog zu den orthogonal aufgenommenen Messlinien bei Handmessungen sollten beide Polarisationsrichtungen bei automatisierten Messungen durch orthogonale Fahrspuren aufgezeichnet werden. Dadurch wird eine Detektion der Bewehrung unabhängig von der Ausrichtung der Bewehrung und der Orientierung der Messspuren sichergestellt.

Um auch die Radarantenne verschleißfrei über die Oberfläche eines großen Objektes bewegen zu können, sollte eine Antenne mit einem Luftspalt über der Messfläche befestigt werden. Als Faustformel gilt hier, dass der Abstand maximal einem Viertel der verwendeten Wellenlänge entsprechen darf [Kind2004]. Analog zu den Überlegungen beim Wirbelstrom-Verfahren erzeugen Unebenheiten der Oberfläche und Neigungen Abweichungen, die sich als Offset zwischen gemessenen und wahren Distanzwerten äußern. Auch hier sollte diese systematische Abweichung durch permanente Messung des Abstandes und rechnerische Einbeziehung eliminiert werden.

#### **9.5.4.2 Ultraschallmessung**

Die Einflüsse auf die Laufzeitsignale des Ultraschallecho-Verfahrens in einem inhomogenen Werkstoff wie Stahlbeton sind vielfältig.

Das Ultraschallecho-Verfahren wird zur Dickenmessung von Bauteilen unter bestimmten Randbedingungen auch bei dichter Bewehrung bis zu einem Meter Dicke erfolgreich eingesetzt [Taffe2008]. Hohe Bewehrungsgehalte beeinflussen die Ausbreitung der Schallwellen und bedeuten Störeinflüsse. Ultraschallwellen werden unter Umständen auch an sehr dünnen Luftschichten, Lufteinschlüssen und Materialien mit deutlich anderen akustischen Eigenschaften total reflektiert oder absorbiert. Aussagen zu darunter befindlichen Bereichen sind dann nicht möglich. Um Fehlinterpretationen auszuschließen, muss zunächst der Aufbau der Einzelschichten ermittelt werden. Dies erfolgt durch Einsichtnahme in die Konstruktionspläne oder durch ergänzende Untersuchungen. Hier bietet die Verfahrenskombination mit anderen Echo-Verfahren (Impakt-Echo, Radar) die Möglichkeit die Prüfaussage abzusichern [Krause2004].

Typisch für Betonuntersuchungen mit Ultraschall ist das sogenannte Kornrauschen, eine durch die Zuschläge und Poren verursachte Rückstreuung, welche die Reflexion einer gesuchten Fehlstelle oft verdeckt. Da Beton wie andere mineralische Baustoffe porös ist (mit Porenradien bis in den mm-Bereich), wird die Reflexion an Grenzflächen wesentlich durch den Luftporengehalt mitbestimmt. Herstellungsbedingt können sich sehr unterschiedliche Reflexionskoeffizienten und Schallausbreitungsgeschwindigkeiten ergeben, die die Gesetzmäßigkeiten der flächigen Reflexion überlagern [Krause2004].

Messtechnisch sind falsche Einstellungen der Vorlaufzeit oder falsch ermittelte Schallgeschwindigkeiten, die ggf. durch einen Mangel an geeigneten Kalibriermöglichkeiten (beispielsweise durch die nur einseitige Zugänglichkeit zum Bauteil) auftreten, für systematische Abweichungen vom wahren Messwert verantwortlich. Unterschiedliche

Ausbreitungsgeschwindigkeiten treten in Bauwerken aus Stahlbeton verteilt über das gesamte Bauwerk immer auf. Auch die Wahl der geeigneten Mittenfrequenz und Sendesignalstärke kann die Messergebnisse systematisch beeinflussen.

Im Hinblick auf die Automatisierung des Verfahrens muss beachtet werden, dass die Ankopplung des Messkopfes an die Oberfläche nicht unter einer ständigen Beobachtung steht, wie dies bei Handmessungen durch einen Prüfer der Fall ist. Abhängig von der Beschaffenheit der Betonoberfläche und dem Andruck des Prüfkopfes können Schwankungen in der in das Bauteil eingebrachten Schallenergie auftreten. Der damit einhergehenden Vergrößerung der Messunsicherheit kann man durch ein dichteres Messraster und Mehrfachmessungen mit Mittelwertbildung je Messpunkt begegnen. Durch fortwährende stichprobenartige Kontrolle der Laufzeitsignale kann dieser systematische Fehler reduziert werden.

### 9.5.5 Fazit zu Kapitel 9.5

Verallgemeinernd lassen sich folgende Erkenntnisse für die Automatisierung von Standardmessgeräten ableiten:

Um einen Sensor automatisieren zu können, sollte er möglichst verschleißfrei oder –arm, d.h. berührungslos oder rollend, über eine Oberfläche geführt werden können.

Ist nur eine berührende, diskontinuierliche Messung möglich, so muss eine entsprechende mechanische Vorrichtung für eine einwandfreie punktweise Ankopplung, ggf. mit dem richtigen regelbaren Anpressdruck, vorhanden sein. Die Gesamtmesszeit vergrößert sich jedoch überproportional gegenüber kontinuierlichen Messungen (nähere Ausführungen hierzu in Kapitel 4.2)

Ein Sensor sollte baustellentauglich, d.h. robust gegen Staub, Schmutz und Feuchtigkeit sowie temperaturstabil oder –kompensiert sein.

Er muss über eine digitale Schnittstelle mit offengelegtem Protokoll und möglichst hohen Datentransferraten sowie kurzen Abfrageintervallen verfügen. Alle Randbedingungen für den Einsatz sollten bekannt sein.

Ein automatisiert eingesetzter Sensor muss mit mindestens der gleichen Sorgfalt wie bei der manuellen Messung angewendet werden.

Im Einzelfall muss sogar noch mehr Augenmerk auf die richtigen Einsatzbedingungen gelegt werden, weil gerade bei einem automatischen Ablauf seitens des Bedieners weniger Aufmerksamkeit zu erwarten ist und systematische Messabweichungen ggf. erst nachträglich bei einer späteren Auswertung bemerkt werden.

Zur ständigen Kontrolle sollte ein permanentes Monitoring der Einzelmesswerte möglich sein. So sollten nicht plausible Werte, die außerhalb sinnvoll festgelegter Grenzwerte liegen, automatisch angezeigt werden.

Eine einheitliche Spannungsversorgung vermeidet den Ausfall einzelner Geräte aufgrund leerer Batterien. Steuerungs- und Bedienelemente sollten mit unterbrechungsfreien Stromversorgungen, die das System robust gegen Spannungsschwankungen und Stromausfälle machen, ausgerüstet werden.

Die aktuelle Pose eines Sensors ist unbedingt automatisch zu ermitteln und zeitnah zu übergeben, damit überhaupt eine großflächige und automatisierte Messdatenaufnahme möglich ist. Dabei spielt die Flexibilität, wie schnell und einfach ein solches Positionermittlungssystem in einer neuen Umgebung eingerichtet werden kann, eine entscheidende Rolle. Laserdistanzmesssysteme, seien es Tachymeter oder Winkelspiegelscanner, ermöglichen globale, referenzierte, schnelle, sehr genaue und absolute Positionsbestimmungen. Winkelcodierer, wie sie meist in Positionsrädern eingesetzt werden, sind deutlich günstiger, technisch weniger aufwendig und liefern exakte, wenn auch nur relative Positionen. Dies jedoch nur in Messlinienrichtung; laterale Abweichungen von der Messlinie werden nicht erfasst bzw. müssen manuell durch das Aufzeichnen von Hilfslinien verhindert werden.

## 9.6 Simulation eines automatisierten Multisensorik-Prüfablaufs

In diesem Abschnitt wird die prinzipielle Herangehensweise an die Simulation eines Multisensoriksystems aufgezeigt. Bei einer Simulation wird versucht, alle Abläufe eines realen Systems durch ein nichtreales (virtuelles) System (meist Softwarekomponenten) nachzubilden und aus dessen dynamischem Systemverhalten auf das Verhalten des realen Systems zu schließen. Konkret bedeutet dies, alle Messgeräte und Komponenten bis hin zum Roboter selbst durch Softwarekomponenten nachzubilden und miteinander agieren zu lassen. Die theoretischen Überlegungen wurden im BetoScan-Projekt zur effizienten Umsetzung von Systemtests während der Entwicklung erfolgreich eingesetzt.

### 9.6.1 Aufbau einer Simulation

Die Simulation komplexer Systeme dient dazu, Verhaltensweisen und Fehler, die bei der Interaktion mehrerer Komponenten untereinander oder bei deren Versagen auftreten können, bereits bei der Entwicklung aufzudecken.

Zudem wird man durch die Simulation in die Lage versetzt, auch ohne das reale System Softwarefunktionen und teilweise auch Hardwarefunktionen ausgiebig testen zu können, da diese umfangreichen Realtests unter Umständen sehr zeit-, material- und personalintensiv sein können. Durch eine Simulation besteht die Möglichkeit, Verfahrensabläufe unbeaufsichtigt und unabhängig von Randbedingungen wie beispielsweise Batterielaufzeiten durchzuführen.

Auch können Situationen, die in der realen Welt nur schwer oder gar nicht nachzubilden sind, etwa weil keine entsprechenden Prüfobjekte vorhanden sind, simuliert werden. Untersuchungen zu Langzeitstabilitäten helfen, die Robustheit eines Systems weiter zu verbessern.

Im Idealfall kann jede Komponente einzeln entweder als reales Gerät oder als simulierte Instanz in eine Gesamtsimulation integriert werden, um zu prüfen, ob die Simulation die Komponente auch richtig abbildet, oder um den funktionellen Ablauf der Prozesssimulation mit einer realen Komponente zu testen.

Um ein reales System möglichst gut durch eine Simulation abbilden zu können, muss für die Modellbildung das reale System hinsichtlich seiner Schnittstellen und Randparameter möglichst eindeutig definiert sein.

Um wiederum Erkenntnisse aus dem Modell in das reale System übertragen zu können, muss das dynamische Systemverhalten, das im Wesentlichen durch die Interaktionen und Reaktionszeiten bestimmt wird, durch die richtige Parametrisierung des Modells möglichst gut mit dem realen System übereinstimmen.

Diese Zusammenhänge sind in der Entwicklung von industriellen Anlagen und Maschinen nicht neu und werden beispielsweise in der Automobilindustrie und für die Entwicklung komplexer Systeme wie beispielsweise bei Flugzeugen [DLR] ausgiebig genutzt.

Für die zerstörungsfreie Prüfung wird hier aufgrund einer völlig anderen Ausrichtung Neuland betreten: **Die in Kapitel 2.3.4 beschriebene übliche lineare Fortbewegung mit zeitlicher Abtastung muss auf ein flächiges System mit zu optimierender Fahrweise erweitert werden.**

Für die Simulation des BetoScan-Systems (Kapitel 2.3.2) wurden alle Einzelkomponenten daraufhin untersucht, ob sie auch als simulierte Instanz per Software oder mit anderer Hardware nachgebildet werden können:

Das BetoScan-System besteht aus den folgenden Grundkomponenten

- Steuerungs PC für die Benutzerinteraktion und Software zur globalen Bedienung des Sensorik- und Navigationsrechners (Grafisches User Interface, GUI)
- Roboterplattform mit Antrieb, Positionssensoren und Navigationsrechner
- ZfP-Sensoren mit Sensorikrechner

Sowohl der Navigationsrechner mit Antrieb und Positions-Sensoren als auch der Sensorikrechner mit den ZfP-Sensoren können durch eine Simulation auf dem Steuerungsrechner ersetzt werden (siehe Abbildung 9-12).

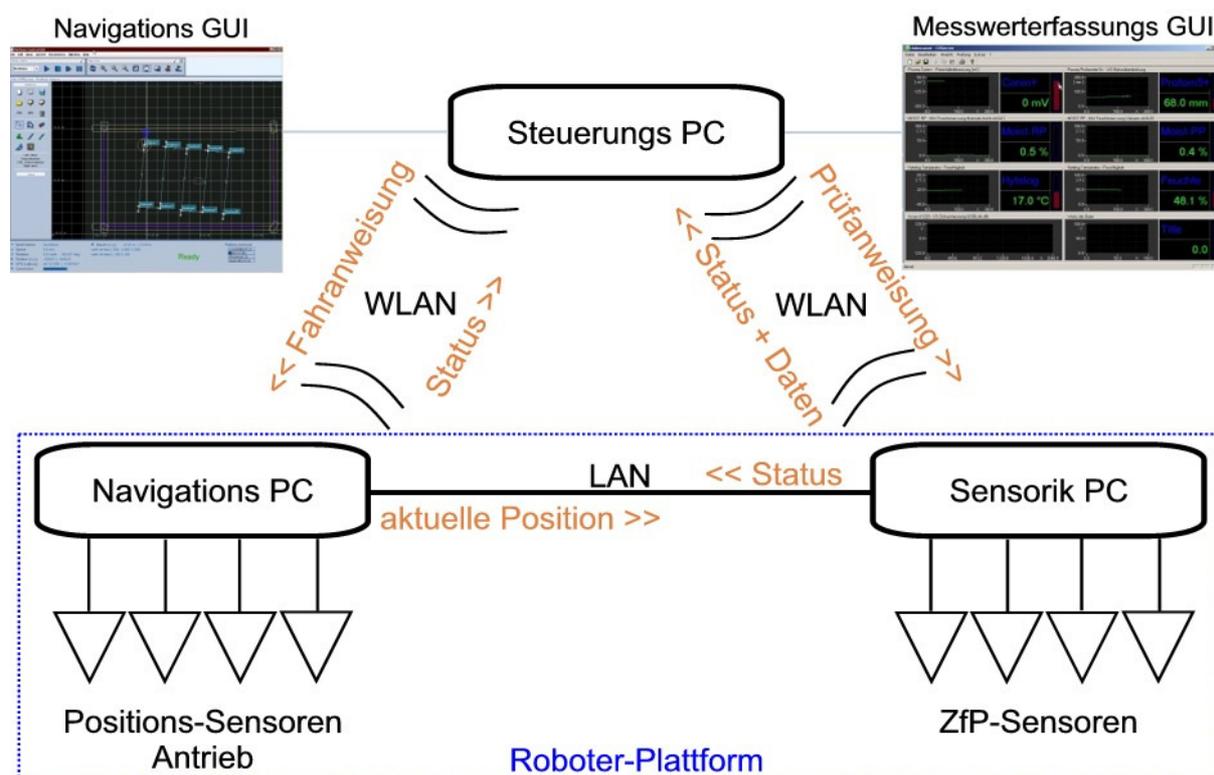


Abbildung 9-12 Struktur der Komponenten und Kommunikationswege des BetoScan-Systems.

Für die Roboterplattform existiert bereits herstellerseitig ein Simulationsmodus der Navigationssoftware, der es ohne Roboter und ohne dedizierten Navigationsrechner erlaubt, alle Fahrbewegungen, Sensorelemente und Kommunikationsschnittstellen zu testen. Da die gesamte interne Kommunikation der Roboterplattform über netzwerkbasierende Sockets verläuft, wird in diesem Fall die reale Roboterhardware durch eine Softwarekomponente

ersetzt, die alle Ein- und Ausgaben mit den entsprechenden Protokollen und Werten beschickt. Die Bedienung der simulierten Plattform erfolgt durch den Benutzer analog zur realen Plattform mit Hilfe derselben Benutzeroberfläche. Eine permanente Ausgabe von Statusmeldungen vereinfacht die Kontrolle aller Funktionen und ggf. die Fehlerinterpretation.

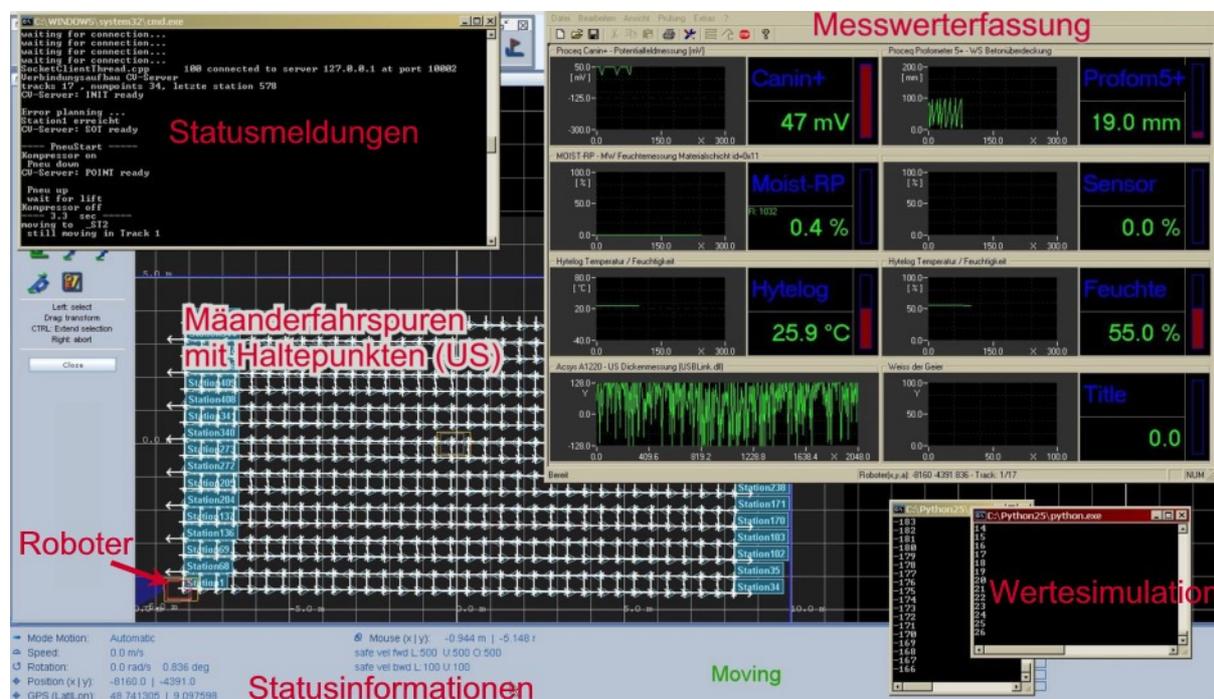


Abbildung 9-13 Bedienungssoftware für Navigation, Messwerverfassung, Statusmeldungen und Wertesimulation

An den Sensorikrechner sind alle Sensoren per Hardwareschnittstelle gemäß Tabelle 8 angeschlossen. Die Kommunikation zu den Positionsdaten des Navigationsrechners und die externe Steuerung der Messwerverfassungssoftware erfolgt auch über Sockets.

Ein wesentlicher Vorteil zeigte sich bereits in der Entwicklung: Im Zeitraum, als die zu entwickelnde Messwerverfassungssoftware noch nicht zur Verfügung stand, wurde ein Simulationsprogramm geschrieben, das die vorher definierte Interaktion mit dieser nachbildet. Somit war es möglich, auch ohne funktionsfähige Messwerverfassung die Fahrspurprogrammierung zu entwickeln und zu testen. Der Übergang zur echten Messwerverfassung erfolgte dann nahtlos. Beide Softwarekomponenten konnten somit unabhängig voneinander parallel und ortsunabhängig erstellt und verwendet werden.

Die Entwicklung der benutzerfreundlichen mäanderförmigen Fahrspurprogrammierung wird in einer Bachelorarbeit [Stärke2009] beschrieben.

Die Software wurde in der Scriptsprache Python [Python] entwickelt, da für diese eine gut dokumentierte Programmierschnittstelle (engl. API - application programming interface) der Roboterplattform verfügbar war. Die Software zielt darauf ab, die Interaktion zwischen Benutzer und der Navigations-GUI durch die automatisierte Abläufe bei der Erstellung von Fahrplanweisungen (Roadmaps) zu vereinfachen. Durch die Vorgabe von drei Positionsmarken, die eine Grundlinie und die Höhe eines zu untersuchenden Messfeldes

markieren, wird unter Berücksichtigung eines einzugebenden Messspurabstandes eine mäanderförmige Roadmap scriptgesteuert erstellt.

Mit der Software kann der Anwender entscheiden, ob eine echte oder eine simulierte Messung durchgeführt werden soll. Ebenso können verschiedene Szenarien mit kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messungen definiert werden.

Für einen Großteil der Geräte wurden Simulationsroutinen entwickelt, die die jeweiligen Messdaten im gleichen Format wie die realen Geräte erzeugen. Somit konnte die Messwerterfassungssoftware ohne reale Messgeräte getestet werden. Ein weiterer Vorteil gegenüber Tests mit realen Geräten ist, dass die simulierten Messdaten in Zeit und Wert durch hinterlegte Funktionen frei variierbar sind und somit auch Extremwerte vorgegeben werden können, die über oder unter den Grenzwerten der Geräte liegen. Damit ist es möglich, durch die Variation von Parametern wie beispielsweise die Dauer von Wiederholungsintervallen oder die Art von Wertemustern zu variieren und damit die Funktion des Gesamtsystems zu testen und dessen Grenzbereiche auszuloten.

Besonderes Augenmerk liegt bei den Tests auf den Grenzen des Systems, die durch das gleichzeitige Ansprechen mehrerer Sensoren auftreten. Hier spielen Taktzyklen und Reaktionszeiten eine wichtige Rolle, die ggf. nicht so stark berücksichtigt werden müssten, wenn nur ein einzelner Sensor verwendet wird.

## **9.6.2 Durchführung von Simulationen**

Ziel der durchgeführten Simulationen war zum einen die Prüfung der allgemeinen Funktionsfähigkeit der Messwerterfassungssoftware, insbesondere neu erstellter Softwarekomponenten, zum anderen die Interaktion zwischen den unabhängigen Softwarekomponenten aus Navigation und Messwerterfassung.

Ein weiterer wichtiger Punkt waren Geschwindigkeitstests, da die verwendeten stromsparenden, lüfterlosen Embedded-PCs in ihrer Leistungsfähigkeit deutlich unterhalb der Benchmarks moderner Computer mit Mehrkernprozessoren anzusiedeln sind.

Drittens wurde die Langzeitstabilität von Messungen in Bezug auf die zu ermittelnden Messwerte und die Handhabung von größeren Datenmengen simuliert. Nicht selten passiert es in der Informatik, dass Variablentypen oder alozierter Speicherplatz zu klein ausgelegt werden und ein Überlauf ein Programm zum Absturz bringt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden beispielhaft einige der simulierten Szenarien beschrieben.

### **9.6.2.1 Funktionstests**

Von Anfang an erwies sich die asynchrone, zyklische und unaufgeforderte Datenübertragung von Messdaten („Pushing“, vgl. Abschnitt 9.5.3) als problematisch. Die Daten laufen im Puffer des verwendeten Com-Ports nach dem Einschalten der Geräte auch ohne bereits gestartete Messsoftware auf. Der Puffer muss also vorab geleert und je nach gewähltem Messintervall an der richtigen Stelle ausgelesen werden. Im Zusammenspiel mit der Abfrage

anderer Kommunikationskanäle können hier Unregelmäßigkeiten und Verzögerungen eintreten, die eine korrekte Messdatenaufnahme verhindern.

Um eine einwandfreie Funktion sicherzustellen, wurde die Messwerterfassungssoftware mit den Daten einer Gerätesimulation beschickt. Hierzu sendet die Simulation alle 200 ms einen Betondeckungswert, der einer (nicht realen) Sägezahnfunktion folgt (Abbildung 9-14A). Gleichzeitig wurden alle anderen Sensoren nach einem echten Messplan von der Messwerterfassungssoftware abgefragt. Die Plateaus in Abbildung 9-14 A zeigen softwarebedingte Aussetzer in der Messwerterfassung in einem frühen Stadium der Softwareentwicklung.

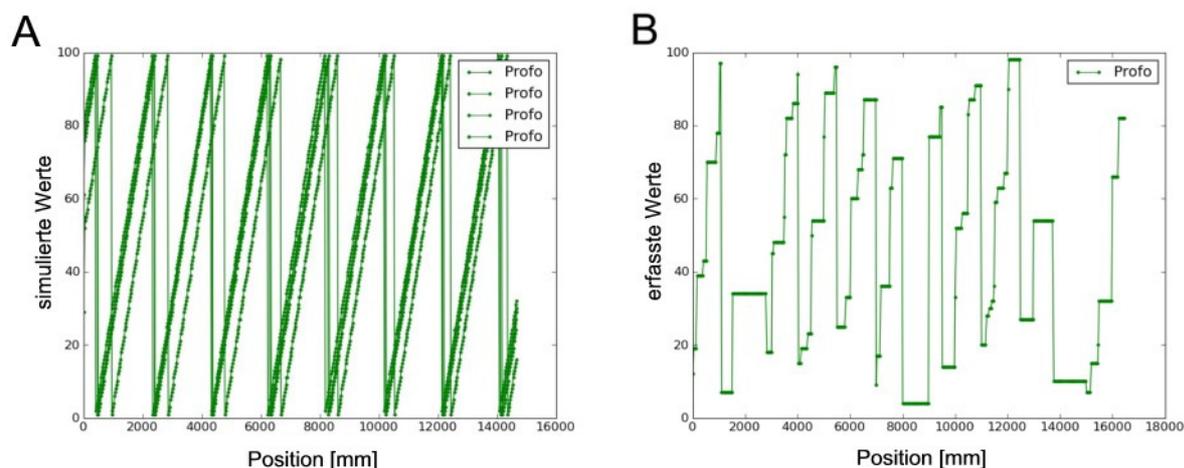


Abbildung 9-14 A: Sägezahnförmige Simulation von Betondeckungswerten mit Versatz in mehreren Fahrspuren, B: Auswertung der gespeicherten Messwerte einer Fahrspur.

Bei der Auswertung (Abbildung 9-14B) zeigte sich durch den Verlauf der Messdaten, dass Aussetzer und eine nicht korrekte Leerung des Puffers für eine falsche Zuordnung der Messdaten verantwortlich waren und die Messwerterfassungssoftware überarbeitet werden musste. Durch den Anschluss eines echten Messgerätes wäre dieser Umstand sicher nicht oder nur schwerer entdeckt worden, da das Gerät im unbewegten Zustand nur einen konstanten Wert liefert und für dynamische Ereignisse durch Überfahrt über einen Bewehrungsstab keine zeitliche Zuordnung möglich ist.

### 9.6.2.2 Geschwindigkeits- und Lasttests

Beim Auslesen von Messdaten aus dem Ultraschallmessgerät traten sporadisch und unreproduzierbar Aussetzer auf, die es erforderlich machten, sowohl Messgerät als auch die Messwerterfassungssoftware neu zu starten. Für eine automatisierte, lang anhaltende Messung ist dies ein untragbarer Zustand, der unbedingt beseitigt werden musste.

Auffällig war, dass dieser Effekt zunächst nur bei realen Messungen am Roboter und nicht bei der Simulation auf einem Labor-PC aufgetreten war.

Schließlich gelang es auch auf dem Labor-PC, diesen Effekt nach dem Durchlauf von mehreren Tausend Messungen zu provozieren, und zwar genau zu einem Zeitpunkt maximaler Systemlast. Dies ließ vermuten, dass dieser Effekt bei dem leistungsschwächeren Embedded-PC eher auftreten würde. Für die weitere Simulation wurde parallel ein

Programm gestartet, dessen Prozessorlast sich gezielt steuern lässt. Ab einer Gesamtprozessorlast von 90 % konnte reproduzierbar die Messwerterfassung zum Absturz gebracht werden.

Eine Nachfrage beim Hersteller des Gerätes führte zu einem Firmware-Update, das den bislang unentdeckten Fehler in der Kommunikation über den USB-Port beseitigte.

### 9.6.2.3 Langzeitversuche

Mehrere Hundert Quadratmeter eines Prüffeldes nur testweise zu untersuchen, um Softwarefehler in Langzeitversuchen zu ermitteln, ist personell wie technisch unwirtschaftlich. Die Simulation liefert hier eine elegante Lösung (Abbildung 9-15), um Langzeitversuche unbewacht und unabhängig von Batterielaufzeiten für (simulierte) große Testflächen durchzuführen.

Abbildung 9-15 zeigt beispielhaft einen Teil eines Messplans mit mehreren Tausend Einzelmesspunkten auf einer ca. zehn Kilometer langen Messspur bei einer Gesamtmessdauer von achtzehn Stunden, die im Simulationsmodus durchlaufen wurde, um die Robustheit des Gesamtsystems zu testen.

Neben der rein funktionellen Überprüfung der Komponenten lieferte diese Simulation auch die Grundlage für die Überprüfung der Berechnungen der Flächenleistung in Abschnitt 4.2.

Die gespeicherten Messdatensätze fanden auch Verwendung bei der Entwicklung der Auswertungs- und Visualisierungssoftware, da bis dato noch keine echten Messdaten vorlagen.



Abbildung 9-15 Teil eines Messplans mit mehreren Tausend Einzelmesspunkten und ca. zehn Kilometer Messspurlänge und einer Gesamtmessdauer von achtzehn Stunden

Letztlich konnte mit den Messdaten auch noch die Langzeitstabilität der angeschlossenen Sensoren geprüft werden, indem die Sensoren unter nahezu konstanten Umgebungs-

bedingungen mehrere Tage an das Simulationssystem angeschlossen und der zeitliche Verlauf der Messwerte aufgezeichnet wurde.

#### **9.6.2.4 Datenintegrität**

Aus den vorgegeben Messpunktabständen und Messspurlängen lässt sich ein theoretischer Wert für die Anzahl der Werte, die in einer Messlinie enthalten sein müssen, berechnen.

In der Simulation ließ sich damit die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit des Systems empirisch ermitteln, bei dem durch eine zu schnelle Fortbewegung Datenpunkte aufgrund zu großer Datenintervalle der asynchron arbeitenden langsamen Sensoren verloren gingen.

#### **9.6.3 Grenzen der Simulation**

Wie eingangs beschrieben, kann eine Simulation ein reales System nicht immer vollständig abbilden, da sich einzelne reale Komponenten in situ abweichend verhalten.

Ein gutes Beispiel dafür ist die Netzwerk-Kommunikation über TCP-Sockets. Simulationen, die intern auf einem lokalen System oder kabelgebunden zwischen zwei Rechnern einwandfrei funktionieren, können beim Übergang auf ein drahtloses Netzwerk (WLAN) durch funktionsbedingte Latenzzeiten und geringe Signalstärken Nachbesserungen an der Kommunikationssoftware erfordern. Beispielsweise wurde festgestellt, dass Mobilfunksysteme die WLAN-Kommunikation so weit stören können, dass die Wiederaufnahme der Verbindung fehlertoleranter und robuster programmiert werden musste.

Bei der Simulation des Fahrverhaltens der Plattform zeigte sich, dass die Simulation mit idealisierten Positionswerten, generiert aus idealen Landmarken/Reflektoren, arbeitet. Im Vergleich zum realen Fahrverhalten wurde festgestellt, dass reale Landmarken häufig auch falsch interpretiert oder ungenau werden und somit häufiger mit Kurskorrekturen zu rechnen ist (siehe auch Kapitel 5).

Wechselnde Umgebungsbedingungen eines Systems sind schwer zu simulieren und bestenfalls durch Langzeitversuche in einer Klimakammer nachzubilden.

Auch Gerätefehler, die evtl. erst durch ein Firmware-Update behoben werden können, können nicht bei einer (angenommenen idealen) Simulation festgestellt werden sondern erst am realen Gerät.

#### **9.6.4 Fazit zu Kapitel 9.6**

Durch eine Simulation der einzelnen Komponenten kann erheblich Zeit für die Inbetriebnahme eines realen Systems eingespart werden. Fehler, die bei der Kommunikation zwischen Messwernerfassungsprogramm und Simulation der Sensorik auftraten und erst bei der Messung mit realer Hardware bemerkt worden wären, konnten bereits im Vorfeld beseitigt werden.

Die in der Simulation ermittelten Flächenleistungen konnten zur Verifikation der theoretischen Überlegungen zur Flächenleistung in 4.2 herangezogen werden, ohne dass

stundenlange Messungen – auf real gar nicht zur Verfügung stehenden Flächen – beaufsichtigt und durchgeführt hätten werden müssen.

Der Vergleich zu den tatsächlichen Gesamtmesszeiten wird in Abschnitt 4.5 ausgeführt.

## Danksagung

---

Mein erster Dank geht an Professor Dr.-Ing. Christian Boller, der mir diese Arbeit ermöglichte. Mit anregenden Diskussionen und wertvollen Hinweisen hat er viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. u. Dir. Dr. Herbert Wiggenhauser danke ich für die intensive und effektive Betreuung an der BAM.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Mitarbeitern der Fachgruppe 8.2 der BAM, die mir hilfreich in Wort und Tat oder auch durch guten Zuspruch motivierend bei der Erstellung dieser Arbeit zur Seite standen.

Danke Dieter, Christian, Ernst, Frank, Rüdiger, Dana, Matthias, Marco, Sean, Thomas, Jens, Doreen, Andreas, Parisa, Tony, Sabine, Kerstin, Sascha, Stefan!

Herrn Dr.-Ing. Alexander Taffe und Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Geophys. Jochen H. Kurz danke ich für die gute Zusammenarbeit in den Innonet-Projekten, die die Grundlage für die automatisierte Messwerterfassung lieferten.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Christoph Dauberschmidt, der mir die entscheidenden Anregungen zur Entwicklung der Methode gab und freue mich auf die weitere Zusammenarbeit.



Kontakt:  
markus.stoppel @ bam.de