

# Automatisierte Multisensorsysteme zur Zustandsbewertung

Andreas ZOËGA\*, Markus STOPPEL\*, Rüdiger FELDMANN\*  
\* BAM Berlin (Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, 030/8104 1449)

**Kurzfassung.** Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind ein zuverlässiges Hilfsmittel für die Zustandsermittlung von Bauwerken. In vielen Veröffentlichungen konnten die Vorteile von flächigen Messungen verbunden mit einer dreidimensionalen Auswertung gezeigt werden. In diesem Artikel soll auf die Automatisierung von Multisensorsystemen für zeit- und personaleffiziente flächige Messungen eingegangen werden. Zwei Systeme mit unterschiedlichen Automatisierungsansätzen und den daraus resultierenden verschiedenartigen Verwendungsmöglichkeiten sollen für einen wirtschaftlichen Einsatz unter den Aspekten der Flexibilität, des Zeitaufwandes und der zu erzielenden Messleistung vorgestellt werden.

## Einführung

Eine leistungsfähige Infrastruktur ist für einen Wirtschaftsstandort von entscheidender Bedeutung. Eine Beeinträchtigung der Infrastruktur zieht neben volkswirtschaftlichen ebenso immense betriebswirtschaftliche Aufwendungen sowohl für den Betreiber als auch für den Benutzer nach sich, dieses gilt es zu verhindern. Um die Nutzbarkeit der Infrastruktur zu gewährleisten, ist die Kenntnis des vorhandenen Bauwerkszustandes von entscheidender Bedeutung, besonders um Erhaltungsmaßnahmen im angemessenen Umfang durchführen zu können und damit das Bauwerk wirtschaftlich zu betreiben. Wird der Bauwerkszustand nicht nur zu einem Zeitpunkt untersucht, sondern über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks (Bauwerksmonitoring), so ist es möglich, neben dem richtigen Umfang der Instandsetzungsmaßnahmen auch den richtigen Zeitpunkt festzulegen. Für die Bestimmung des Bauwerkszustandes ist die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) ein elementares Instrument. Die ZfP im Bauwesen (ZfPBau) kann über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes wichtige Informationen liefern, sei es zur Qualitätskontrolle der Ausführung zu Beginn des Lebenszyklus, zum Bauwerksmonitoring über den gesamten Lebenszyklus oder zur Schadensanalyse. Damit trägt die ZfPBau dazu bei, Kosten zu reduzieren.

Diesen Ansätzen Rechnung tragend werden heutzutage mit ZfPBau-Verfahren unterschiedlichste Aufgaben durchgeführt. Beispielhaft seien genannt:

- Qualitätssicherung von Tunnelneubauten mit der RI-ZFP-TU [1]
- Im Zuge der Brückenprüfung kommen bei der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) ZfPBau-Verfahren zum Einsatz. [2]

Mit zunehmendem Einsatz von ZfPBau-Verfahren stellt sich die Frage nach deren Wirtschaftlichkeit. Ein Ansatz zur Kostenreduktion ist die Automatisierung von personalintensiven Handmessungen. Dieser Artikel zeigt beispielhaft anhand zweier neu entwickelter Messsysteme, wie die Automatisierung von ZfPBau-Verfahren im Bauwesen sinnvoll eingesetzt werden kann und welche Vorteile damit verbunden sind.





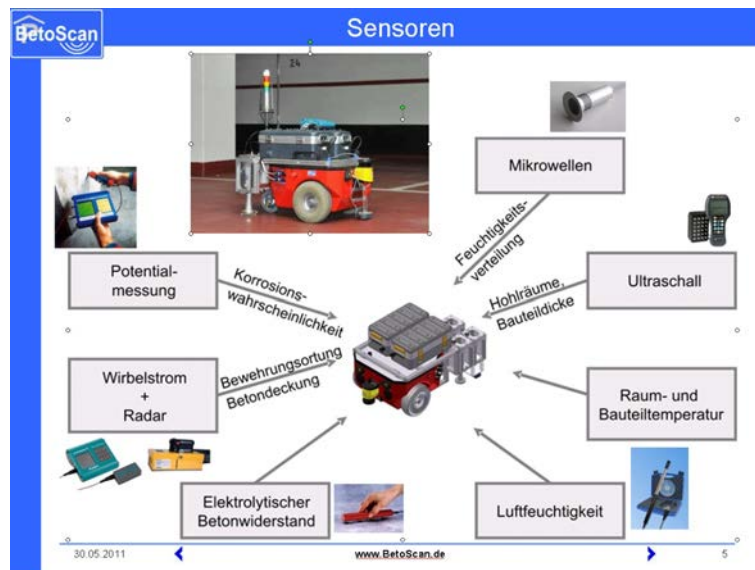
**Abbildung 2:** Roboterplattform mit Sensorik (Wirbelstrom, Mikrowellen-Feuchtemesser, Ultraschallarray, Radar)

Nach einer Orientierungsfahrt, bei der durch einen an der Vorderseite angebrachten 270°-Laserscanner erkannte Wände, Stützen und markante Orientierungspunkte in einer grafischen Oberfläche (GUI) eingetragen werden, wird ein optimaler mäanderförmiger Fahrweg innerhalb des definierten Prüfbereichs errechnet. Durch zusätzlich angebrachte Ultraschallsensoren ist die Plattform in der Lage, auf bewegliche Hindernisse zu reagieren. An der Rückseite der Plattform sind alle ZfP-Sensoren in modularen Sensorhalterungen angebracht, die werkzeuglos gewechselt werden können. Eine Ausnahme bildet der Wirbelstromsensor, der wegen seiner Empfindlichkeit gegenüber in der Nähe befindlichem Metall an der Vorderseite des Roboters befestigt wird. Das Halterungssystem ist entwickelt worden, um alle Sensoren frei positionierbar aufnehmen zu können und eine einfache Montage vor Ort sicherzustellen. Weitere Sensoren können bei Bedarf leicht integriert werden.

Die maximale Fahrgeschwindigkeit wird durch die langsamste Sensorik bestimmt, die bei einem Messeinsatz verwendet wird. Diese liegt im ungünstigsten Fall bei 0,1m/s. Die Plattform kann Geschwindigkeiten bis zu 1m/s erreichen. Während einer Prüfung ist das System somit in der Lage, unter optimalen Bedingungen mehrere hundert Quadratmeter Fläche pro Tag zu untersuchen. Die großformatigen Batterien an der Oberseite der Plattform liefern hierzu ausreichend Energie für eine Messdauer von mindestens zehn Stunden. Die Messdaten werden zentral mit den entsprechenden Lagekoordinaten auf einem im System integrierten Computer abgespeichert und sind vor Ort vom Anwender abrufbar. Für jeden Messparameter kann so vor Ort eine Kartierung der Messdaten erfolgen.

Im Rahmen des Projektes wurden nur etablierte und bereits erprobte Sensoren und Verfahren eingesetzt, die automatisierbar sind und über eine geeignete und vom Hersteller offengelegte Schnittstelle zur Datenübernahme verfügen. Zudem wurde darauf geachtet, dass die verwendeten Sensoren weiterhin als separate Handmessgeräte eingesetzt werden können, wodurch das Untersuchungsnetz in kritischen oder schwer zugänglichen Bereichen durch Hand- oder ggf. durch Scannermessungen nach Bedarf verfeinert werden kann.

Anwendungsbereiche können sich bezüglich der Messaufgaben stark voneinander unterscheiden. Ziel ist es, durch eine geeignete, der Prüfaufgabe angepasste Kombination von Sensoren möglichst detaillierte Informationen zum Bauwerkszustand zu gewinnen.



**Abbildung 3:** BetoScan: Übersicht aller modular einsetzbaren Sensoren

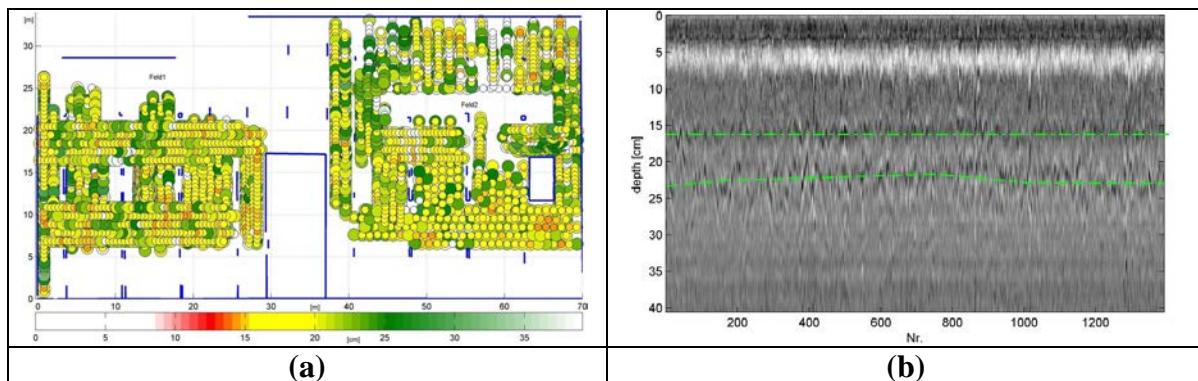
Bei Stahlbetonbauteilen, die über einen längeren Zeitraum Tausalzen ausgesetzt waren, hat sich zur Eingrenzung kritischer Korrosionsbereiche die Potentialfeldmessung bewährt. In den vergangenen Jahren sind hierfür erschwingliche Messinstrumente auf den Markt gekommen, die das Messen, Speichern und Ausgeben der elektrochemischen Potentialwerte ermöglichen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um ein Verfahren handelt, dessen Messergebnisse immer mit den vorliegenden Randbedingungen abgeglichen werden müssen und daher nur von kundigen Anwendern interpretiert werden sollten. Eingesetzt wird hier das „Canin+“ der Fa. Proceq in Kombination mit einer Cu/CuSO<sub>4</sub> Radelektrode.

Im Rahmen einer Bauteiluntersuchung oder einer Qualitätssicherung ist eine Überprüfung der Betondeckung hinsichtlich der für die jeweilige Expositionsklasse geforderten Werte von erheblicher Bedeutung. Zur Ermittlung der Betondeckung sowie der Bewehrungsverteilung können Bewehrungssucher basierend auf dem Wirbelstromverfahren und Radargeräte eingesetzt werden. Im Projekt wurde die gleichzeitige Integration beider Geräte favorisiert, da hierdurch die Aussagesicherheit der Messergebnisse erhöht werden kann. Eingesetzt wird das „Profometer 5+“ der Firma Proceq und das „GPR ProEx System“ der Firma Mala.

Das Ultraschallverfahren ermöglicht die Bestimmung der Bauteildicke und eine Lokalisierung von Defekten wie Hohllagen und Kiesnestern, wenn sie großflächig auftreten bzw. eine größere Ausdehnung als die gewählte Messpunktdichte besitzen. Jedoch müssen an dieser Stelle baustoffbezogene Details (Größtkorn, Oberflächenbeschaffenheit etc.) bekannt sein, um die Apparatur und Messstrategie anzupassen. Zum Einsatz kommt hier das „A1220 Monolith“ der Firma Acsys, dessen Ultraschallköpfe kein Koppelmittel zum Ankoppeln an die Oberfläche benötigen, was eine Grundvoraussetzung für eine großflächige automatisierte Messung an Beton darstellt. Der Messkopf wird automatisch im Stillstand der Plattform mit einer pneumatischen Vorrichtung an die Oberfläche gedrückt.

Zur Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung des zu untersuchenden Bauteils kommen Mikrowellensensoren der Firma HF-Sensor „Moist PP“ und „Moist RP“ zum Einsatz. Für dieses Verfahren sprechen der geringe Einfluss des Salzgehaltes auf die Ergebnisse und die Möglichkeit der kontaktlosen Messung zur Datenaufnahme während der Fahrt.

Praxiseinsatz: Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer Bauteildickenmessung mit Ultraschall. Hierzu wurden auf ca. 1500 m<sup>2</sup> 4000 Einzelmessungen in zwei ausgesuchten Bereichen innerhalb von zwei Tagen aufgenommen.



**Abbildung 4:** (a) Farbskalierte Bauteildicken (4000 Einzelmessungen), der Grundriss (blau) wurde automatisch erzeugt und direkt aus dem Messsystem exportiert. (b) Pseudo-B-Bild mit zwei ermittelten Horizonten bei der Dickenmessung

Für die Darstellung der Bauteildicken an den einzelnen Messpunkten wurde bewusst keine flächige Interpolation gewählt, da der Abstand zwischen den Messpunkten mit 0,5 m bis 1 m größer ist als Strukturen mit möglicherweise unterschiedlicher Bauteildicke. Diese Darstellung wirkt als Einzelbild unübersichtlich, jedoch kann in der Auswertungssoftware die Darstellung beliebig vergrößert werden.

Im vorliegenden Fall wurde versucht die Fragestellung zu beantworten, inwieweit sich die Gesamtdicke einer Bodenplatte mit darunterliegender Sauberkeitsschicht sicher bestimmen lässt. Bei Handmessungen ergaben sich in den A-Bildern immer sprunghaft verschiedene Bauteildicken von bis zu 5 cm Unterschied selbst an dicht benachbarten Messpunkten. Abbildung 4 (b), bei der alle A-Bilder eines Messbereichs nur der Reihenfolge nach geordnet als Pseudo-B-Bild aufgetragen wurden, verdeutlicht dies. Es sind zwei Reflexionshorizonte zu erkennen: Der erste Reflexionshorizont resultiert aus Echos am Übergang zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht. Der zweite Reflexionshorizont gibt die Stärke des Gesamtaufbaus wieder. Das erste Echo tritt aber nicht in allen Fällen auf, sodass hier bei Einzelmessungen die Laufzeit des Gesamtaufbaus ermittelt wurde. Im anderen Extrem ist die Reflexion an der Grenze zur Sauberkeitsschicht so groß, dass die zweite Reflexion nicht mehr detektierbar ist und die Bauteildicke als zu gering ermittelt bzw. der ersten Reflexion zugeordnet wird. Erst der großflächige Einsatz mit einer statistisch relevanten Anzahl von Messpunkten liefert in diesem Fall eine sichere Aussage über den tatsächlichen Gesamtaufbau.

Der Einsatz dieses diskontinuierlichen Verfahrens erhöht wie erwartet die Gesamtmesszeit deutlich, da die kontinuierliche Fahrbewegung für jeden Messpunkt unterbrochen werden muss und eine Ultraschallpunktmessung je Messpunkt durch das pneumatische Andrücken ca. vier Sekunden andauert. Dennoch zeigt sich, dass mit dem System auch die Erfassung der Bauteildickenverteilung großer Flächen möglich ist und in bestimmten Fragestellungen sinnvoll sein kann, da andere Verfahren wie in diesem Fall nicht in Frage kommen.

Die Messungen mit den kontinuierlichen Verfahren wurden parallel zu der diskontinuierlichen Messung während der Fahrbewegung vorgenommen, sodass keine weiteren Messungen erfolgen mussten.

### 3. ZFP-Scanner

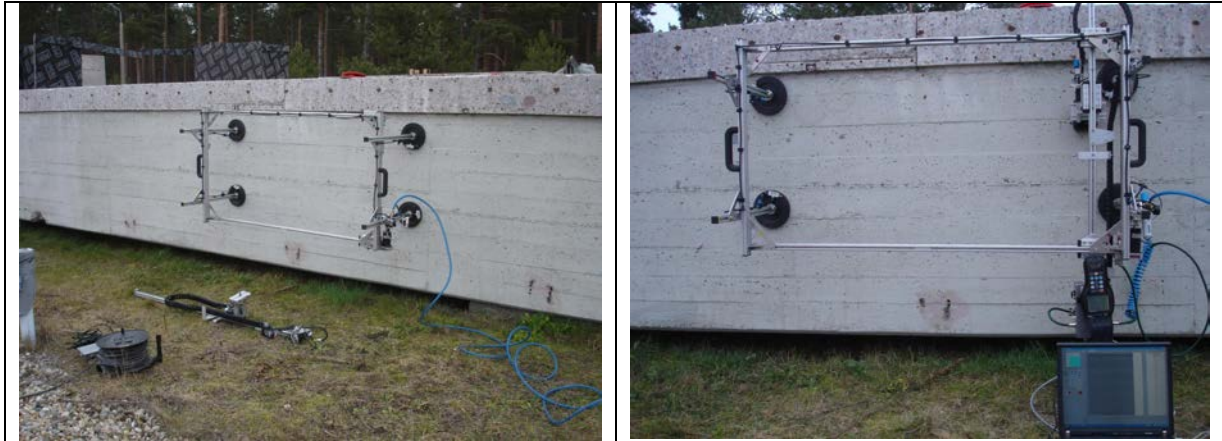
Neben der im Kapitel zuvor gezeigten großflächigen Aufnahme von Bauteileigenschaften ist es häufig erforderlich, die genaue Lage von Einbauteilen über die gesamte Tiefe des Bauteils zu orten. Dieses ist z.B. für die Verankerung von externen Spanngliedern zur Brückenverstärkung notwendig [4]. Deren Verankerungspunkte liegen zumeist in stark

belasteten Bereichen. Ein Bohren ohne die Bestimmung der exakten Lage der teilweise in mehreren Lagen eingebauten Spannglieder kann die vorhandene Bausubstanz nachhaltig schädigen. Für diesen genauen Blick auch hinter davor liegende Einbauteile und oberflächennahe Bewehrung ist eine Rekonstruktionsrechnung und damit ein enger Punktabstand erforderlich. In diesen Fällen ist es nicht nötig, ganze Bauteile zu untersuchen, sondern nur kleinflächig die betroffenen Areale zu betrachten, hier die Verankerungsbereiche.

Exakt auf derartige Aufgabenstellungen ist der ZFP-Scanner ausgerichtet: die hochgenaue Untersuchung von begrenzten Flächen. Insbesondere wurde auf die Praxistauglichkeit und Robustheit für den alltäglichen Einsatz sowie die Zeit- und daraus resultierende Kosteneffizienz Wert gelegt.

Im Transportzustand kann der ZFP-Scanner in einem normalen PKW transportiert oder im Flugzeug mitgeführt werden. Bauteile, die nur durch kleine Serviceöffnungen erreichbar sind, können geprüft werden. Der ZFP-Scanner ist mit wenigen Handgriffen zerleg- und wieder zusammenbaubar. Der Zeitaufwand beträgt ca. 15 min., wodurch ein schneller Messbeginn vor Ort realisiert werden kann (Abbildung 5). Der ZFP-Scanner besteht aus zwei Baugruppen, zum Einen dem Rahmen, der leicht, robust und mithilfe von Saugfüßen schnell und einfach am Bauteil zu platzieren ist. Je nach Randbedingungen bedarf es keiner weiteren Sicherung (z.B. durch Dübel etc.). Der zweite Teil des ZFP-Scanners ist die Messschiene. Sie nimmt die gesamte Messtechnik und Steuerung auf und kann nach Montage des Rahmens via Klickmechanismus und Sicherungsschraube am Rahmen befestigt werden.





**Abbildung 5 Bild 1+2:** Transportverpackung (0 Minuten); Bild 3 Rahmen (4 Minuten); Bild 4 Rahmen mit Saugfüßen (8 Minuten); Bild 5 Rahmen platziert (10 Minuten), Bild 6 Messfertiges System mit Rahmen und Messschiene, Rechner zur Steuerung im Vordergrund (15 Minuten).

Zur Reduktion von Bauteilen und Kabelverbindungen ist die gesamte Messdatenerfassung und Schrittmotorsteuerung in den ZFP-Scanner integriert. Der ZFP-Scanner muss lediglich mit Strom und Druckluft versorgt werden. Über USB kann der ZFP-Scanner an ein handelsübliches Notebook angeschlossen werden, von dem aus der ZFP-Scanner gesteuert und die Messdaten gespeichert werden.

Ebenso wie beim Aufbau auf Schnelligkeit und einfache Handhabung wert gelegt wurde, ist die Bedienung während der Messung dahingehend optimiert. Die Steuerung des ZFP-Scanners und die Messdatenerfassung erfolgt mit Hilfe nur eines Programms. Neben der Wahl des Messverfahrens müssen die Messfeldparameter über ein intuitiv zu bedienendes animiertes Bedienfeld eingegeben werden. Sämtliche Messungen werden zur Qualitätskontrolle als A- und B-Bild angezeigt, erste Aussagen können getroffen werden. Auf eine komplette Analysemöglichkeit vor Ort wurde verzichtet, da hierfür spezielles Expertenwissen notwendig ist. Zur Kostenreduktion ist die Bedienung vom ZFP-Scanner dahingehend ausgelegt, dass sie von angelerntem Messpersonal übernommen werden kann.

Ein weiterer entscheidender Faktor für die Kosteneffizienz ist, dass die Messtechnik nicht fester Bestandteil des ZFP-Scanners ist. Standard-Messgeräte, wie sie bei vielen ZfPBau-Dienstleistern bereits vorhanden sind, können angeschlossen (A1220, GSSI Sir 20) und trotzdem weiter als Handgeräte verwendet werden. Eine Doppelanschaffung von Messgeräten entfällt somit.

**Praxiseinsatz:** Bei Demonstrationsmessungen in den USA sollten die Möglichkeiten von Scannermessungen an mehreren Tunnelbauwerken gezeigt werden, eine Veröffentlichung der wissenschaftlichen Ergebnisse erfolgt an anderer Stelle.

Aufgrund des kleinen Packmaßes im zerlegten Zustand war es zum ersten Mal möglich, den ZFP-Scanner als Fluggepäck aufzugeben und mittels eines PKWs zwischen den weit voneinander entfernt liegenden Tunnelstandorten zu transportieren. Teilweise waren die Messstellen in den Belüftungsschächte nur durch kleine Serviceöffnungen zugänglich, die kompakte und portable Bauweise ließ den Zugang und einen schnellen Wechsel zwischen den Tunnelbereichen (Lüftungsschächte, Verkehrsbereiche) problemlos zu. Die schnelle Ab- und wieder Aufbaubarkeit ermöglichte nach der Ankunft vor Ort einen Messbeginn in ca. 30 Minuten, inklusive Bereitstellung von Strom- und Druckluftversorgung. Je nach Verfahren und Messpunkt Abstand ergaben sich auf einen m<sup>2</sup> bezogene Messzeiten von (Tabelle 1):

**Table 1:** Messdauer für einen m<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren und Messpunktabstand in Minuten.

Radar beide Polarisationsrichtungen 5cm Spurbabstand	20
Ultraschall 2,5 cm Raster	60
Ultraschall 5 cm Raster	15
Impakt-Echo 2,5 cm Raster	66
Impakt-Echo 5 cm Raster	17

Bei den zweiwöchigen Testmessungen konnte der ZFP-Scanner seine Robustheit und Praxistauglichkeit auch unter widrigen Umgebungsbedingungen unter Beweis stellen. Die Tunnel lagen zwischen -20 m bis 3400 m Höhe mit Temperaturen teilweise um den Gefrierpunkt. Auch bei sehr feuchten oder staubigen Umgebungsbedingungen konnte der ZFP-Scanner zuverlässig messen. Durch die leichte Handhabbarkeit und Transportfähigkeit sowie den daraus resultierenden geringen Umsetzzeiten konnte die Messleistung pro Tag wesentlich gesteigert werden.

#### 4. Zusammenfassung

Für die Zustandserfassung von Bauwerken sind ZfPBau-Verfahren sinnvolle Werkzeuge. Flächige Untersuchungen und die flächige Auswertung zeigen Vorteile, insbesondere wenn Einzelmessungen indifferente Ergebnisse zeigen, welches anhand der Ultraschallmessungen von BetoScan gezeigt werden konnte. Die Aussagesicherheit kann des Weiteren durch die Verknüpfung mehrerer Verfahren gesteigert werden. Beide Automatisierungssysteme sind modular aufgebaut, um jeweils die für eine Fragestellung am besten geeigneten Verfahren auswählen zu können. Die flächigen Messungen, zudem mit mehreren Verfahren, sind jedoch zeitaufwändig und für das Messpersonal ermüdend.

Die Automatisierung von ZfPBau-Verfahren stellt einen Ansatz dar, die Messkosten zu minimieren. Dieses kann nur gelingen, wenn sich die Automatisierung ihrerseits praxistauglich, robust sowie effizient in der Anwendung gestaltet. In diesem Artikel wurden zwei Automatisierungssysteme mit unterschiedlicher Zielrichtung vorgestellt: Zum einen BetoScan zur Untersuchung großer Verkehrsflächen, bei dem die Flächenleistung entscheidend für den effizienten Einsatz ist und zum Anderen der ZFP-Scanner, bei dem aufgrund der kleineren Messflächen die Flexibilität, die Auf- und Abbaueiten eine essentielle Rolle für den wirtschaftlichen Einsatz darstellen.

Mit den hier vorgestellten Automatisierungsansätzen wurde gezeigt, dass automatisierte Messungen sinnvoll, zeit- und kostensparend sein können. Die beiden Systeme sind als Werkzeug zu verstehen, die aber nur durch einen sachkundigen Bediener auswertbare Ergebnisse liefern, wie es bei Handmessungen ebenfalls der Fall ist. Damit werden dem ZfP-Experten zwei Möglichkeiten zur Verfügung gestellt, die effektive Werkzeuge in einer auf die Randbedingungen angepassten Messstrategie sein können.

#### Referenzen

- [1] Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU) Ausgabe 2007, ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1, Anhang A.
- [2] Bundesanstalt für Straßenwesen: Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse, Internetpräsenz: <http://www.bast.de> (2008) unter Fachthemen / Objektbezogene Schadensanalyse bei Ingenieurbauwerken / Download des Leitfadens.



- [3] Friese, M., Taffe, A., Wöstmann, J. und A. Zoëga: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte , Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 65, Bergisch-Gladbach: Wirtschaftsverlag NW, April 2009, CD-ROM, 52 Seiten
- [4] Kind, T., Wöstmann, J. und B. Milmann: Ortung vorgespannter Bewehrung an einer Stahlbetonbrücke mit Radar und Ultraschall, Vortrag bei den Rundtischgesprächen Georadar, 6-7.10.2011, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.