

Bestandsaufnahme und Zustandsanalyse von Brücken und Parkhäusern mit automatisierten Verfahren

Alexander TAFFE, Markus STOPPEL, BAM, Berlin
Jochen H. KURZ, IZFP Saarbrücken

Kurzfassung. Brücken und Parkhäuser sind in den vergangenen Jahren zunehmend in den Blickpunkt der Betoninstandsetzung gerückt. Vielfältige Schädigungsmechanismen haben an diesen Bauwerken über die Jahre zu sichtbaren und unsichtbaren Schäden geführt. Die Kenntnis der Ursache dieser Schäden und deren Lokalisation, sind das Ergebnis einer gründlichen Bestandsaufnahme in Verbindung mit einer Zustandsanalyse. Durch automatisierte zerstörungsfreie Prüfverfahren und deren Kombination stehen dem sachkundigen Planer neuartige Werkzeuge zur Verfügung. Inwieweit diese Verfahren einen Mehrwert bringen, ob sie klassische Verfahren ergänzen oder ersetzen sollten und wo ihre Grenzen liegen, wird in diesem Beitrag beschrieben.

Einführung

Viele Brücken und Parkhäuser haben eine Nutzungsdauer von dreißig bis vierzig Jahren hinter sich und weisen einen zunehmenden Instandsetzungsbedarf auf. Aufgrund konstruktiver Schwachstellen, zunehmender Belastung durch Verkehr und in Folge langjähriger Umwelteinflüsse sind zahlreiche Schädigungsmechanismen am Werk, die an diesen Bauwerken über die Jahre zu sichtbaren und unsichtbaren Schäden geführt haben. Die Kenntnis der Ursache dieser Schäden ist unerlässlich, um die richtigen Instandsetzungsmaßnahmen auszuwählen. Die genaue Kenntnis über Lage und Umfang der Schäden sind Voraussetzung zur Planung des erforderlichen Instandsetzungsumfanges. Daher sind eine gründliche Bestandsaufnahme und eine genaue Zustandsanalyse Grundvoraussetzungen für eine bedarfsgerechte Instandsetzung.

Bestandsaufnahme und Zustandsanalyse werden in der Regel mit klassischen zerstörungsfreien, zerstörungsarmen und auch zerstörenden Prüfverfahren durchgeführt. Dabei gehören Betondeckungsmessungen in Verbindung mit Phenolphthaleintest, Potentialfeldmessung zusammen mit Chloridanalyse oder Bohrkernentnahme in Verbindung mit visueller Bemusterung und Druckfestigkeitsbestimmung zum bewährten Repertoire von Bauwerksprüfern in Zusammenarbeit mit dem sachkundigen Planer nach Rili SIB. Doch auch diese Verfahren haben ihre Anwendungsgrenzen: Sind von einem Bauwerk keine Bestandspläne vorhanden, um die Standsicherheit rechnerisch nachzuweisen und gelingt es mit den klassischen Verfahren nicht, die innere Konstruktion des Bauteils durch bildgebende Verfahren zu ermitteln, kommt zum (als unvermeidbar angesehenen) Abriss. Ein weiteres Manko ist die begrenzte Aussagesicherheit eines einzelnen Messverfahrens. So erfordert eine zuverlässige Bewertung von Ergebnissen der

Potentialfeldmessung zusätzliche Untersuchungen wie Betonfeuchte, Betondeckung oder Chloridanalyse.

In diesem Beitrag wird beschrieben, wie mit der Automatisierung und Kombination von zerstörungsfreien Prüfverfahren bisherige Anwendungsgrenzen überschritten werden und welcher Mehrwert bei der Bestandsaufnahme und Zustandsanalyse von Parkhäusern und Brücken erzielt werden kann.

1. Entwicklung von automatisierten Messwerterfassungssystemen

Für eine Vielzahl von ZfPBau-Verfahren existieren am Markt bewährte Handgeräte, die i.d.R. nur *einen* Parameter messen, von dem dann auf eine Kenngröße oder auf den Bauwerkszustand geschlossen wird. Die Messergebnisse sind jedoch meist nicht analytisch und geben nur eine Verdachtsstelle an. Um einen vorliegenden Verdacht zu erhärten oder entkräften, bedient man sich häufig eines anderen, physikalisch unabhängigen Verfahrens. Solche Verfahrenskombinationen geben, wenn sie gezielt eingesetzt werden, verbesserten Aufschluss zur Lösung einer Prüfaufgabe. Das Potenzial der **Kombination von Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar** wurde bereits Mitte der 1990er Jahre für den Massivbrückenbau erkannt [1].



(a)



(b)



(c)

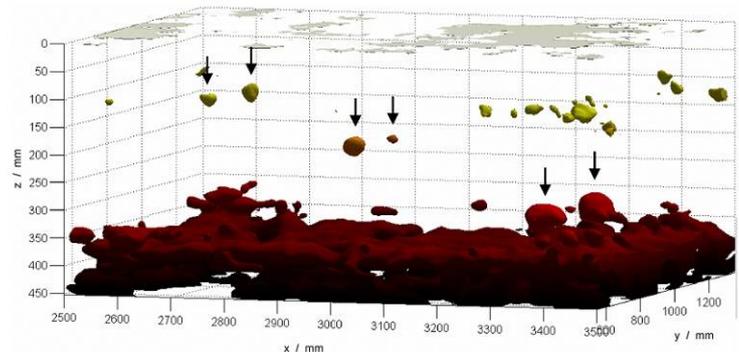
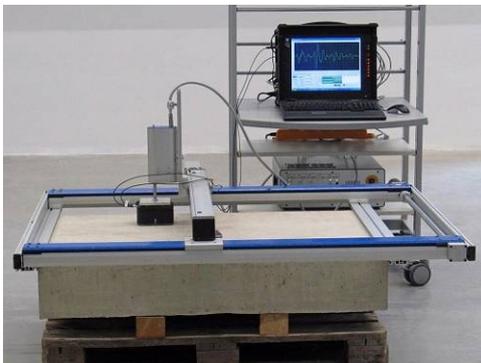


(d)

Abbildung 1 Verschiedene von der BAM entwickelte Baustellenscanner: (a) Baustellenscanner mit multifunktionalem Prüfkopf zur gleichzeitigen Ultraschallecho- und Impakt-Echo-Messung (links unten) bzw. Radarmessung (rechts unten). (b) Scanner zum Einsatz an vertikalen Flächen unter Brückenkappen, (c) Über-Kopf-Einsatz und (d) selbstfahrender Stepper. ([5], [6])

In den Jahren 1998 [2] und 2002 [3] folgten initiiert durch die BAST umfangreiche Berichte über zwei Brückenbauwerke, die vor und nach dem Abbruch mit Radar, Impakt-Echo und Ultraschallecho untersucht wurden und deren Ergebnisse nach dem Abbruch verifiziert werden konnten. Neben der bildgebenden Darstellung der schlaffen Bewehrung und der Spannglieder stand die Ortung von Verpressfehlern im Vordergrund. Dazu mussten Messflächen am Bauwerk z.T. im 1 cm-Raster abgetastet werden, was sehr zeitaufwändig war. Deshalb wurde bei der Untersuchung der Talbrücke Haiger [3] erstmals ein automatisches Impakt-Echo-Datenaufnahmesystem von der BAM eingesetzt. Die Entwicklung solcher automatisierten Messwerterfassungssysteme, später als **Baustellenscanner** bezeichnet [4], wurde in den Folgejahren fortgesetzt, da die bildgebende Darstellung der Messergebnisse eine Vielzahl von Einzelmessungen erfordert. Der Messpunktabstand der Messraster beträgt zwischen 2 und 5 cm, was zu Flächenleistungen mit Ultraschallecho bzw. Impakt-Echo von 0,4 to 1,5 m²/h führt [5]. Radar liefert als kontinuierliches Verfahren bei einem Messspurabstand von 5 cm eine Flächenleistung rd. 15 m²/h.

In [7] wird über ein von der MfPA Weimar entwickeltes Scannersystem berichtet, das zur schnellen Untersuchung mit Ultraschall und anschließender bildgebender Darstellung konzipiert wurde (Abbildung 2a). Der Scanner kann außer mit Prüfköpfen, die mit Wasser angekoppelt werden, mit einem selbst entwickelten Array aus Punkt-Kontakt-Prüfköpfen betrieben werden, das kein Koppelmedium benötigt. Außerdem ist die Nutzung für Luftultraschall möglich. Ein Abtasten der Scanfläche von 1,0 x 0,7 m² dauert bei einem Messraster von 1 cm rd. 4 Stunden, bei einem Messraster von 5 cm rd. 12 Minuten. Das bedeutet in Bezug auf die oben beschriebenen Systeme eine Verbesserung der Flächenleistung um mehr als das Doppelte. Das Scannersystem verfügt außerdem über eine Software zur dreidimensionalen SAFT-Rekonstruktion der Ergebnisse und zur bildgebenden Darstellung wie in Abbildung 2b dargestellt ([8], [9]).



(a) Scannersystem der MfPA Weimar zur Ultraschallmessung mit Ankopplung durch Wasser, ohne Koppelmedium bzw. mit Luftultraschall. (b) Bildgebende Darstellung der Ergebnisse des in (a) dargestellten Scanners: 3-D Darstellung von 6 Polystyrolkugeln mit 100 mm Durchmesser. [7]

Basierend auf dieser Entwicklung von Scannersystemen und der kombinierten Anwendung von ZfPBau-Verfahren wurden in der BAM zwei neuartige Systeme entwickelt, die in den beiden nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

2. Entwicklung eines robusten und flexiblen Baustellenscanners zum Vor-Ort-Einsatz an Brücken (OSSCAR)

Im Rahmen des vom BMWi geförderten innoNet-Programms wird derzeit in dem Verbundvorhaben OSSCAR (On-Site Scanner) aus einem Konsortium von dreizehn Partnern (Forschung, Industrie und KMU) ein neuartiges Scannersystem entwickelt. Der OSSCAR-Scanner erlaubt die kombinierte Untersuchung mit **Ultraschallecho, Radar und Wirbelstrom** und die nachfolgende **bildgebender Darstellung der Ergebnisse vor Ort**. Dabei steht als Prüfaufgabe im Vordergrund, für eine wenige Quadratmeter große Messfläche, die zuvor von einem Brückenprüfingenieur festgelegt wird, detaillierte Kenntnisse über die innere Konstruktion zu gewinnen, um **aus den Messergebnissen nachträglich einen Bestandsplan abzuleiten**. Folgende Eigenschaften des Scanners, die für einen Einsatz unter Baustellenbedingungen unerlässlich sind, wurden dabei umgesetzt:

- **Flexibel:** Kleine Außenabmessungen von rd. 1,25 x 1,00 cm² erlauben auch Messungen in beengten Verhältnissen
- **Robust:** Geschlossene Trägerprofile mit innen verlegten Kabeln und Versorgungsleitungen sowie Scannerkomponenten der Schutzklasse IP67 erlauben Einsätze in rauer Umgebung
- **Leicht transportierbar und installierbar:** Die Scannerachsen bestehen aus drei separaten Trägern, die vor Ort zusammengesteckt werden. Damit ist ein Zugang über enge Mannlöcher bzw. Kriechgänge in Hohlkästen möglich. Die Befestigung erfolgt wahlweise zerstörungsfrei mit Saugfüßen oder mit Ankern.

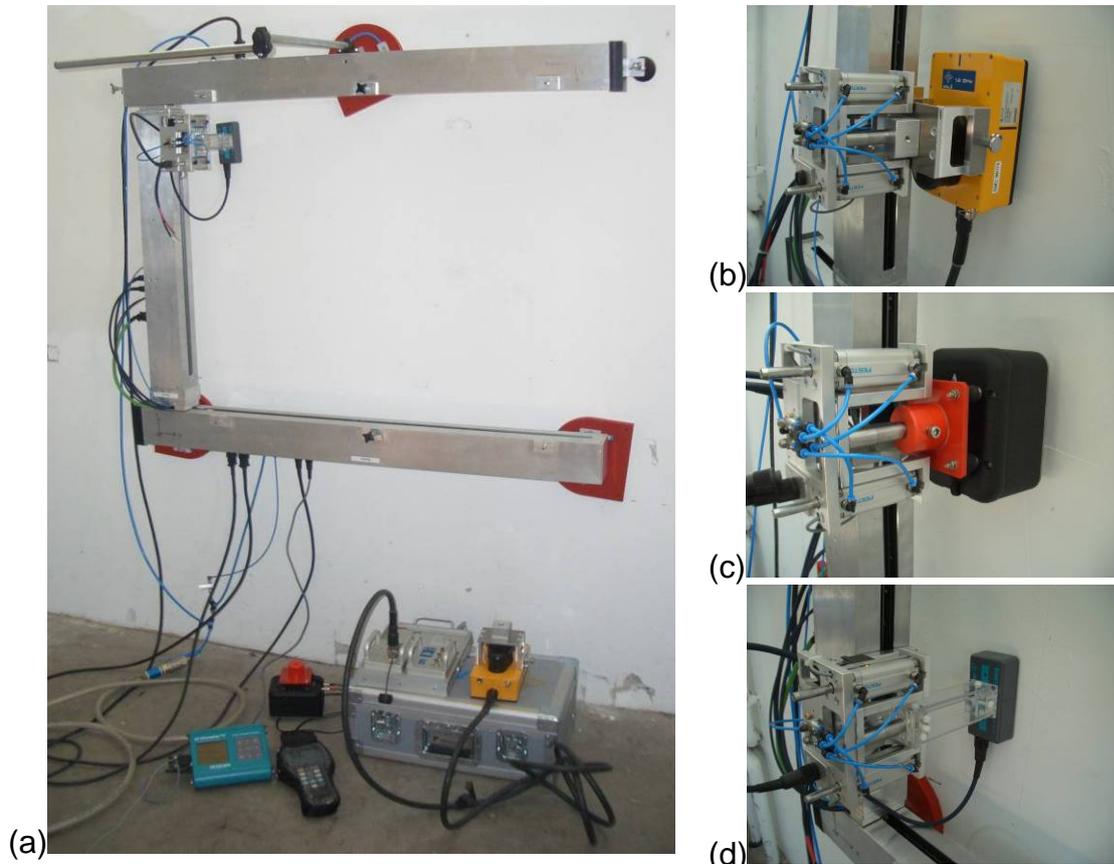


Abbildung 3 (a) OSSCAR Scannersystem mit den verwendeten Messgeräten für Radar (Mala ProEx), Ultraschallecho (ACSYS A1220) und Wirbelstrom (Proceq Profometer 5+); Prüfkopfhalterungen für (b) Radarantenne, (c) Ultraschallprüfkopf und (d) Sensor zur Betondeckungsmessung

Die **einheitliche Software** erlaubt **Scannersteuerung, Datenerfassung, Datenverarbeitung und bildgebende Darstellung** in Einem. Die Daten werden nur in dem einen Programm bearbeitet. Ein Aus- und Einlesen in verschiedene Programme entfällt damit. Der Scanner wurde für drei Handgeräte konzipiert, die am Markt etabliert sind und ohne Modifikation zur automatischen Datenaufnahme integriert werden können. Dabei wurden folgende Geräte ausgewählt, in Abbildung 3 dargestellt sind:

- **Radar:** Pro-Ex System der Firma Mala (Schweden) mit Antennen von 1,2 GHz, 1,6 GHz und 2,3 GHz
- **Ultraschall:** A1220 Monolith der Firma ACSYS (Russland) mit Punkt-Kontakt-Prüfkopf für Transversalwellen (30 bis 85 kHz) für den Betrieb ohne Koppelmittel
- **Wirbelstrom:** Profometer 5+ der Firma Proceq (Schweiz)

Die zuvor beschriebenen Geräte können wahlweise weiter als Handmessgerät oder als Scannergerät betrieben werden. Damit bleibt dem Nutzer die Flexibilität für die jeweilige Messaufgabe erhalten. Die Integration anderer Messgeräte ist von Seiten der verwendeten Software möglich und erfordert seitens des Geräteherstellers eine Offenlegung seiner Schnittstellen.



(a)



(b)

Abbildung 4 (a) Messung in einem hohlkastenartigen Bereich oberhalb einer Stütze. (b) Messung an einem vorgespannten Längsträger im „Remote“ Betrieb (Scannersteuerung im Fahrzeug)

Die Messungen mit Ultraschallecho, Radar und Wirbelstrom werden nacheinander durchgeführt, so dass drei genau kongruente Flächen mit den Ergebnissen entstehen. Durch die zuverlässige örtliche Zuordnung der Reflektoren (Bewehrung, Hüllrohr, Rückwand) und der Defekte (Fehlstelle, Verpressfehler) mit einem oder mehreren Verfahren können zuverlässigere Aussagen zur Rekonstruktion eines Bauteils und der nachfolgenden Darstellung der inneren Konstruktion des Bauteils getroffen werden. In Abbildung 4a ist eine Messung in einem hohlkastenähnlichen Bereich dargestellt, wobei sich die Scannersteuerung unmittelbar neben der Messfläche befindet. Alternativ kann der Scanner auch am Bauwerk messen, wobei die Scannersteuerung am Boden verbleibt und der Scanner quasi ferngesteuert wird („Remote“ Betrieb in Abbildung 4b).

3. Entwicklung einer Multisensorplattform zur großflächigen Untersuchung von Parkdecks (BetoScan)

Im Gegensatz zu dem im vorigen Kapitel beschriebenen Scanner dient der im Rahmen des Verbundforschungsprojekts **BetoScan** (ebenfalls vom BMWi im Rahmen des innoNet-Programms gefördert) entwickelte mit zerstörungsfreier Messtechnik ausgestattete Roboter dazu, *große* Flächen von bis zu mehreren Hundert Quadratmetern pro Tag in einem ausreichend dichten Messraster *gleichzeitig* mit mehreren Verfahren zu untersuchen. Auch hier ist der Grundgedanke, die Zuverlässigkeit der Messergebnisse durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Messverfahren an einem Messort zu erhöhen.

Dabei ist die Vorgehensweise vergleichender bzw. ergänzender Untersuchungsverfahren bei der Zustandsermittlung oder der Schadensdiagnose in der Betoninstandsetzung nicht neu. In [10] wird von Potentialfeldmessungen berichtet, die um Betondeckungsmessung und Widerstandsmessung mit einer Wenner-Sonde ergänzt werden. Die Verdachtsstellen, die von der Potentialfeldmessung geliefert werden, können hinsichtlich ihrer möglichen Korrosionsaktivität in Bezug zur vorhandenen Betondeckung und der Oberflächenwiderstände (als Indikator für Betonfeuchte) zuverlässiger eingeschätzt werden. So sind große Potentialdifferenzen bei großer Betondeckung und großen Oberflächenwiderständen kritischer einzustufen als bei vergleichsweise geringerer Betondeckung oder kleineren Widerständen. Die großflächige Gesamtschau der Ergebnisse in Form von Zustandskarten kann hier zu einer zuverlässigeren Ortung von korrosionsaktiven Bereichen beitragen. Damit kann die Grundlage einer bedarfsgerechten Instandsetzung gelegt werden (Abbildung 5).

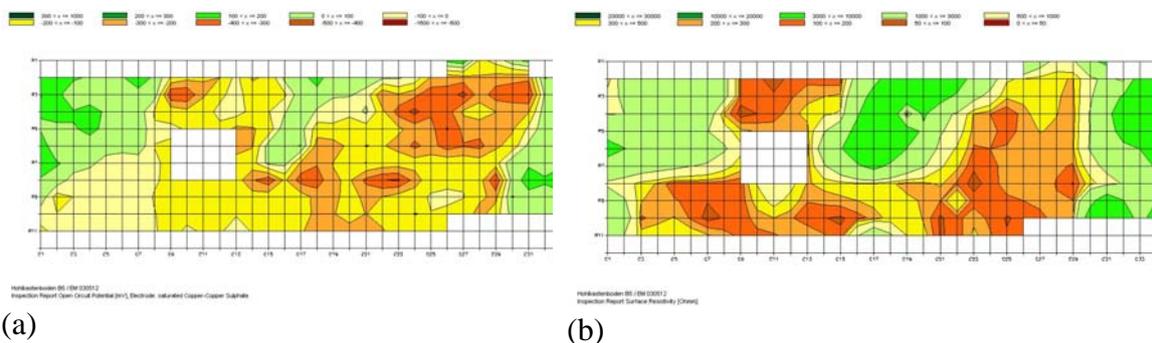


Abbildung 5 (a) Ergebnisse einer Potentialfeldmessung und (b) einer Widerstandsmessung eines Hohlkastenbodens (Quelle: Citec Survey [10])

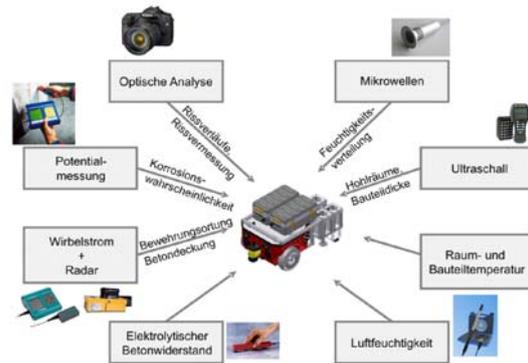
Auch das *Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion in Stahlbetonbauwerken (B3)* der DGZfP [11] fordert im Prüfprotokoll die Angabe ergänzender Untersuchungsergebnisse. So wird beispielsweise die Darstellung der Potentialverteilung und der Betondeckung im gleichen Bezugssystem gefordert. Zusätzlich soll der Zustand der Oberfläche (Risse, Abplatzungen usw.) festgehalten werden. Ergänzend soll auch noch der Elektrolytwiderstand festgestellt werden. Diese hinsichtlich der korrekten Auswertung der Ergebnisse notwendigen Forderungen lassen sich bei Handmessungen in einem Messraster von 25 cm wie in [11] gefordert mit genauer Ortszuordnung nur mit großem Aufwand erfüllen.

Basierend auf den positiven Erfahrungen der Kombination verschiedener Untersuchungsverfahren und den Anforderungen gemäß Merkblatt B3 der DGZfP wurde der Ansatz verfolgt, auch andere leistungsfähige zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Radar [12], [13] und Ultraschallecho [14], [15] bei der Zustandserfassung zu integrieren. Durch

automatisierte Datenaufnahme in einem je nach Bedarf einzustellenden Messraster von wenigen cm bis 1 m mit automatisierter Zuordnung der Messdaten zum Messort kann das in der Praxis oft angetroffene Hindernis überwunden werden, wonach dichte Messwerterfassung mit mehreren Verfahren wegen des hohen Kartierungsaufwandes meist unterbleibt. Daher wurde im Forschungsprojekt BetoScan eine selbstfahrende und selbstnavigierende Roboterplattform für mehrere Sensoren und Messgeräte konzipiert, die es ermöglicht, großflächige Bauteile autonom zu befahren, und die zur Diagnose benötigten Daten mit einer hohen Datendichte automatisch zu sammeln und abzuspeichern. Hierdurch können die spezifischen Messwerte kombiniert ausgewertet werden, wodurch verschiedene Synergieeffekte ausgenutzt werden können.



(a)



(b)

Abbildung 6 (a) Roboterplattform mit Sensorik (Wirbelstrom, Mikrowellen-Feuchtemesser, Ultraschallarray, Radar) (b) Übersicht aller modular einsetzbaren Sensoren. [16]

Mit dem entwickelten BetoScan-System steht erstmals eine selbstnavigierende Roboterplattform zur Verfügung, die über die in Abbildung 6b dargestellten Verfahren verfügt. Die Ergebnisse aller Messverfahren werden in einem *einheitlichen* Koordinatensystem in so genannten Zustandskarten dargestellt.

Beispielhaft zeigt Abbildung 7 das Ergebnis einer ersten Betondeckungsmessung mit Wirbelstrom in einem Parkhaus über eine Fläche von 100 m², die innerhalb einer von 90 Minuten nahezu flächendeckend aufgenommen wurde. Der Abstand der Fahrspuren betrug 20 cm, wobei jeden Zentimeter innerhalb der mäanderförmigen Fahrspuren ein Wert erhoben wurde. Derzeit wird an der Optimierung der Messintervalle im Zusammenhang mit der Fahrgeschwindigkeit gearbeitet, sodass hier noch zeitliche Verbesserungen um Faktor zwei zu erwarten sind.

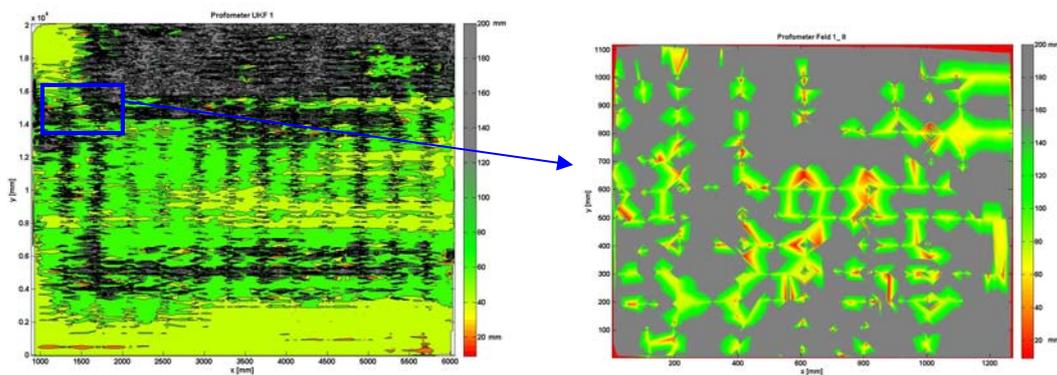


Abbildung 7 Betondeckungsmessung in einem 20 x 5 m² großen Bereich (links aus Platzgründen verzerrt dargestellt) und rechts die Vergrößerung des blauen Bereichs. In der Detailaufnahme des auffälligen Bereichs bei etwa (1,3 m; 15 m) wurde diese kleinere Fläche zusätzlich in Querrichtung mit einem Messpunktabstand von 1 cm untersucht. In der grafischen Darstellung kann dadurch die Lage einzelner Bewehrungsstäbe aufgelöst werden.

Die offene Architektur der Software erlaubt es, weitere automatisierbare zerstörungsfrei arbeitende Sensoren nachträglich einfach zu integrieren. Abhängig vom Messraster und Spurabstand können damit pro Tag mehrere Hundert Quadratmeter eines Parkdecks aufgenommen werden. Dies kann z. B. zum Zeitpunkt der Abnahme geschehen, um großflächig die Einhaltung der Betondeckung zu dokumentieren („Birth Certificate“). Bei Bestandsbauwerken können Schwachstellen mit geringer Betondeckung, hoher Feuchte und vermehrter Rissbildung identifiziert werden und als Grundlage zur Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer dienen. Darüber hinaus können wie oben bereits beschrieben korrosionsaktive Bereiche mit Blick auf die Betondeckung, den Betonwiderstand und den Zustand der Oberfläche zuverlässiger detektiert werden und als Grundlage einer präziseren „Massenermittlung“ von Betoninstandsetzungsleistungen dienen.

Selbstverständlich sind Einschränkungen zu berücksichtigen, wenn (nichtleitende) Oberflächenschutzsysteme aufgetragen werden und nachfolgend eine großflächige Potentialfeldmessung dann nicht mehr möglich ist. Daher kommt es nicht nur auf die Messgrößen an, die ermittelt werden. Ebenso wichtig ist auch eine vom sachkundigen Planer festgelegte Messstrategie, wann gemessen wird, an welchen Stellen und wie oft hintereinander. So kann z. B. auch ein Monitoring kritischer Parkflächen durchgeführt werden. Daher ist es notwendig, dass Planer die Möglichkeiten der kombinierten Untersuchung kennen lernen und zusammen mit ZfP-Experten wirkungsvolle Messstrategien entwickeln, um die anstehenden Prüfaufgaben zur bedarfsgerechten Instandsetzung von Parkhäusern und Parkgaragen zuverlässig und kostengünstig zu lösen. Dabei ist der Roboter stets als *Werkzeug* zu verstehen, der aber nur durch einen *sachkundigen* Bediener auswertbare Ergebnisse liefert, wie es bei Handmessungen auch der Fall ist.

Referenzen

- [1] Krieger, J.: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Betonbrücken, Bautechnik 73 (1996) 1, S. 23-31
- [2] Krieger, J., Krause, M. und H. Wiggenhauser: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 18, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 143 Seiten (1998).
- [3] Krieger, J., Krause, M. und H. Wiggenhauser: Materialtechnische Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger, Durchführung von Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 38, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- [4] 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
- [5] Streicher, D., Kohl, Ch., Wiggenhauser, H. und A. Taffe , Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken , Beton- und Stahlbeton 101 (2006) 5, S. 330-342
- [6] 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
- [7] Schickert, M. and U. Tümmel: Initial Measurement Results of an Automated Ultrasonic Scanning and Imaging system, in: Derobert, X. and O. Abraham (eds.); 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering NDTCE 09, Nantes, F, 30.06.-03.07.2009, Chapter Automated testing, Proceedings pp. 417-424 and CD ROM
- [8] Schickert, M., Krause, M., Müller, W. 2003. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE), ASCE Vol. 15 (2003) 3: 235-246
- [9] Schickert, M.: Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion, in: Bergmeister, K. (Hrsg.) Beton-Kalender 2007, Berlin: Ernst und Sohn (2007), Kap. V, Abschnitt 7, S. 536-543
- [10] Schneck, U.: Qualifizierte Korrosionsuntersuchungen an Stahlbetonbauwerken, Bautechnik 82 (2005) 7, S. 443-448.
- [11] Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion in Stahlbetonbauwerken, DGZfP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin (2008).
- [12] 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.
- [13] Maierhofer, C., Wöstmann, J. und Kohl, C.: Strukturuntersuchung von Betonbauteilen mit Radar in: 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. 5, S. 512-518.
- [14] Krause, M.: Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.4, S. 341-352.
- [15] Kroggel, O., Glaubitt, A., Neisecke, J., Jahnsen, R. und Pierson, R.: Ultraschallverfahren in: 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. 2, S. 483-496.
- [16] Stoppel, M., Taffe, A., Reichling, K. und J. Kurz: Zustandsermittlung und Schadensdiagnose für Parkhäuser mit automatisierten zerstörungsfreien Prüfverfahren , Beton- und Stahlbetonbau, 104 (2009) 10, Ernst & Sohn, S. 690-694