

Automatisierte Abbildungssysteme, Visualisierung und Wege zu einem Qualitätsmanagement

Martin SCHICKERT¹

¹ Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPa) an der
Bauhaus-Universität Weimar, Weimar
E-Mail martin.schickert@mfpa.de

Kurzfassung. Für die Zustandsanalyse von Betonbauwerken steht inzwischen eine ganze Reihe von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verfügung. Einige dieser Verfahren wurden auf eine automatisierte Datenerfassung erweitert, wodurch auch größere Bereiche von Betonbauteilen untersucht werden können. Die Messdaten aus einzelnen oder kombinierten Verfahren können bildgebend verarbeitet werden, um den Zustand oder Merkmale der Struktur zu visualisieren und Einbauteile oder Fehlstellen abzubilden.

Dieser Beitrag präsentiert Beispiele von halb- und vollautomatisierten Mess- und Abbildungssystemen, darunter Scanner und Arraysysteme, hebt die Wechselbeziehung zwischen automatisierten Systemen und angepasster Visualisierung hervor und versucht, eine Perspektive für die Verwendung der Zustandsdaten für ein Qualitätsmanagement von Betonbauwerken zu eröffnen.

Es werden technische und formale Rahmenbedingungen diskutiert, die zur Etablierung eines Qualitätsmanagements während Bau und Nutzung eines Bauwerks erforderlich sind. Der Ausblick versucht einen Weg von den heutigen, fallweisen Schadensuntersuchungen hin zu einem umfassenden Qualitätsmanagement von Bauwerken unter Einschluss des *Building Information Management* zu zeigen.

Einführung

Mittlerweile steht eine ganze Reihe zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) für die Anwendung an Betonbauwerken zur Verfügung. Allein die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) hat acht Merkblätter herausgegeben, die jeweils ein Verfahren der Bauwerksprüfung beschreibt [1].

Derzeit werden ZfP-Verfahren hauptsächlich zur Schadensdiagnose während des Baus oder der Nutzung eingesetzt. Üblicherweise führen sichtbare Fehler zur Suche nach einem Verfahren, mit dem fehlerhafte Bereiche lokalisiert werden können. Die Untersuchung wird dann manuell oder teilautomatisiert durchgeführt. Aber um die Ausführungsqualität nach dem Bau zu sichern, um Folgeprobleme zu vermeiden oder vor größeren Schäden einzugrenzen, um zeitliche oder nutzungsbedingte Änderungen zu detektieren oder um die Restlebensdauer eines Bauwerks abzuschätzen, ist eine Zustandsanalyse notwendig, die in ein Qualitätsmanagement eingebettet ist. Qualitätsmanagement beginnt mit Inspektionsplänen und beruht auf Untersuchungen, die in regelmäßigen oder in angepassten Intervallen durchgeführt werden, ähnlich der heutigen visuellen Brückenprüfung. Um dazu

verschiedene ZfP-Verfahren einsetzen und große Datenmengen aufnehmen zu können, können automatisierte Mess- und Abbildungsverfahren eine große Hilfe sein.

Automatisierte Mess- und Abbildungssysteme wurden hauptsächlich entwickelt, um größere Messbereiche an Betonbauteilen messtechnisch erfassen zu können. Mechanische Scanner, autonome Roboter oder *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) können punktuelle Einzelmessungen auf einem großen Messraster oder gleich ganze Flächen effektiv aufnehmen. Die Rastergröße hängt dabei u. a. von der lateralen Änderungsrate der Messgröße und teils auch von der verwendeten Wellenlänge ab. Einige automatisierte Systeme können mehrere Sensoren aufnehmen, um die Messgeschwindigkeit zu erhöhen oder parallel verschiedene Messgrößen aufzuzeichnen.

Eine automatisierte Datenaufnahme führt zu großen Datenmengen, die aufbereitet und klar präsentiert werden müssen, um ihre Interpretation zu erleichtern. Die Darstellung in Bildern erleichtert es dem menschlichen Auge, verrauschte oder unklare Ergebnisse zu interpretieren. In den aufgeführten Visualisierungsbeispielen werden Farbtabelle, Transparenz, Isoflächen oder andere Bildattribute verwendet, um die Aussagekraft der Bilder zu erhöhen. Farben können auch verwendet werden, um abgebildete Objekteigenschaften wie Luftspalte an Spannkämen zu repräsentieren.

1. Automatisierung

1.1 Beispiele

Berührungslos arbeitende Systeme mit mechanischen Impaktoren eignen sich zur Detektion von Delaminationen und zur Kartierung der Festigkeit von Fahrbelägen.

Ein luftgekoppeltes Multi-Sensor Impakt-Echo Testsystem ist in **Bild 1**, links, abgebildet (University of Illinois at Urbana-Champaign, [2]). Mit einem linearen Mikrofon-Array, das manuell über die Oberfläche geschoben wird, und automatisch erzeugten Impakts können Delaminationen unterhalb der Oberfläche einer Fahrbeläge detektiert, lokalisiert und charakterisiert werden. Das System enthält eine vollautomatisierte Datenverarbeitungs- und Bilddarstellungs-Software, die Variationen der Transparenz in den Bildern verwendet, um eine einfache Interpretation der Ergebnisbilder zu ermöglichen (siehe auch **Bild 7**). In der gezeigten Anwendung wurden 94 m² einer Fahrbeläge unter Verkehr in 90 Minuten gescannt.



Bild 1. Messdatenerfassung mit einem luftgekoppelten Impakt-Echo Messsystem auf einer Brücken-Fahrbeläge (University of Illinois at Urbana-Champaign, [2]) (links), luftgekoppeltes Messsystem für Oberflächenwellen mit einem fahrbaren Mikrofon-Array (Lund University, [3]) (rechts)

Für das berührungslose Testen von Fahrbahnbelägen und Betonbauteilen mit Oberflächenwellen wurde ein fahrbares Mikrofon-Array mit einer automatischen Impakt-Quelle entwickelt (Lund University, [3]). Die Messungen werden ausgelöst, während das Messsystem manuell über die Oberfläche geschoben wird (**Bild 1**, rechts). Die Ergebnisse werden im Hinblick auf den dynamischen Elastizitätsmodul ausgewertet und ergeben eine Karte der Belagsfestigkeit. Der Aufbau kann außerdem für zementstabilisierte Fahrbahnbeläge verwendet werden.

Mit Ultraschall- und Radarverfahren werden bevorzugt flächige Bereiche von Betonbauteilen untersucht, um Aussagen über das gesamte Volumen zu erhalten. Automatisierte Scanner sind ein wichtiges Werkzeug für die Vereinfachung und Beschleunigung der Datenaufnahme.

Das automatisierte Ultraschall-Abbildungssystem FLEXUS wurde für die Untersuchung von Betonbauteilen entwickelt (MFPA Weimar, [4]). Es besteht aus einem kommerziellen Niederfrequenz-Ultraschallgerät, einem mechanischen 3-Achsen-Scanner mit einer Scanfläche von 1,00 m x 0,80 m und einer Softwareumgebung für den Betrieb und Vor-Ort-Bilddarstellung (**Bild 2**). Das Ultraschall-Lineararray besteht aus 48 Prüfköpfen in 16 elektronisch gesteuerten Gruppen, die dynamisch in beliebigen Konfiguration angesteuert werden und so verschiedene SAFT- und CSAFT-Abbildungsverfahren (*[Combinational] Synthetic Aperture Focusing Technique*) realisieren können. Durch die Auswahl der entsprechenden SAFT-Variante kann der Messprozess für eine hohe Bildqualität oder eine hohe Messgeschwindigkeit bis zu 12 min/m² optimiert werden.

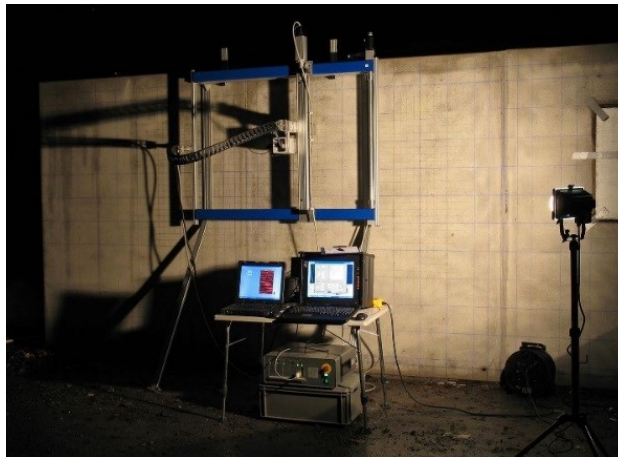


Bild 2. FLEXUS Ultraschall-Abbildungssystem für automatisierte Arraymessungen und 3D-SAFT/CSAFT-Abbildungen (MFPA Weimar)

Der modulare OSSCAR-Scanner wurde speziell im Hinblick auf einfachen Transport und einfache Handhabung entwickelt (BAM, IZFP, [5]). Sein zerlegbares Design macht ihn besonders mobil, z. B. beim Transport durch enge Durchgänge. Der Scanner wird durch Unterdruck an der Oberfläche gehalten und besitzt einen 1,00 m x 0,50 m großen Scanbereich (**Bild 3**, links). Er kann mit verschiedenen Ultraschall-, Radar- und Wirbelstromsensoren ausgerüstet werden, wobei ausschließlich fertige Sensoren von handelsüblichen Handgeräten verwendet werden. Das Messsystem enthält eine integrierte Software für Scannersteuerung, Messung und Bildgebung.

Ein Beispiel aus einer Reihe von Scannern, die an der BAM für Vor-Ort-Untersuchungen entwickelt wurden, ist der besonders leichte Hannibal-Radar-Scanner. Die Messzeit liegt für einen Scanbereich von 2,30 m x 1,80 m unter 15 Minuten, selbst wenn beide Antennenpolarisationen und ein Spurabstand von 1 cm verwendet werden. Die Anwendung in **Bild 3**, rechts, zeigt die Prüfung von Schleusenwänden auf Bereiche geringer

Festigkeit. Der Scanner wurde dafür von einem Fahrzeug aus über ein Seilsystem mit Gegengewichten eingesetzt.



Bild 3. Modularer OSSCAR Scanner (BAM, IZFP, [5]) (links), leichtgewichtiger Hannibal Radar Scanner (BAM, mit Genehmigung) (rechts)

Der autonome Roboter RABIT wurde konstruiert, um Fahrbahnplatten auf Brücken bildgebend auf Bewehrungskorrosion, Delaminationen und verminderte Betonqualität zu untersuchen (Rutgers University, [6]). Er trägt eine umfangreiche Auswahl von Sensoren, u. a. für Radar, Ultraschall-Oberflächenwellen, Impakt-Echo und elektrische Widerstandsmessung (**Bild 4**). Digitale Kameras ermöglichen eine visuelle Prüfung der Betonoberfläche und eine Rundumsicht. Die Datenaufnahme erfolgt zügig und vollständig autonom, wobei die Position des Roboters mit Hilfe von GPS (*Global Positioning System*) aufgezeichnet wird. Die Software für Online-Datenanalyse und -Datenfusion erzeugt Karten der Betonzustandes, der Betonüberdeckung, der Betonqualität und von Delaminationen. Die Visualisierungssoftware präsentiert alle Informationen in einem gemeinsamen, dreidimensionalen Raum, in dem Anzeigen die unterschiedlichen Schadensgrade markieren. Für Plausibilitätstests können die Datenquellen einzeln ein- und ausgeschaltet werden, wodurch eine schnelle Überprüfung von Korrelationen zwischen Oberflächenschäden und inneren Schädigungsprozessen möglich wird.

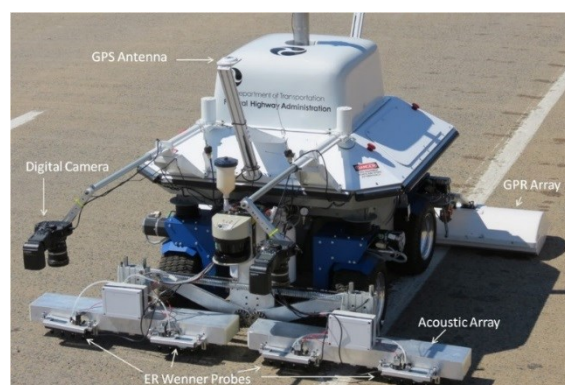


Bild 4. Autonomer RABIT Scanner für Fahrbahnplatten auf Brücken (Rutgers University, mit Genehmigung)

Ein weiteres autonom arbeitendes Messsystem ist der BetoScan (IZFP, BAM, [7], nicht gezeigt). Er besteht aus einem selbstnavigierenden, mobilen Roboter mit einer Aufnahme für Module, die verschiedene berührende und berührungslose Sensoren enthalten können. Verfügbar sind Sensoren u. a. für Potentialfeldmessung, Mikrowellen-Feuchtemessung,

Radar und Ultraschall. Das Messsystem ist speziell auf die Untersuchung von Stahlbetonböden vor allem in Tiefgaragen ausgerichtet, die einer hohen Tausalzbelastung ausgesetzt sind.

Ein UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) kann dafür verwendet werden, Gebäude und Bauwerke an Bereichen zu untersuchen, die schwierig zu erreichen sind (Bauhaus-Universität Weimar, [8]). Das UAV trägt eine Digitalkamera zur Dokumentation der Oberfläche; eine Software zum automatischen Zusammenfügen von Fotos (*Stitching*) und zur Merkmalsextraktion ist derzeit in Entwicklung. Zur Erkennung von Rissen wird eine Bildverarbeitung eingesetzt. Das Einsatzbeispiel in **Bild 5** zeigt das UAV bei der Inspektion einer Brücke nahe Geschwenda, Thüringen, und einen dabei detektierten Riss in der Betonoberfläche.



Bild 5. Ein UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) inspiziert eine Brücke (links), Luftbild eines Risses im Beton (rechts) (Bauhaus-Universität Weimar, [8])

1.2 Probleme und Konsequenzen

Die meisten Probleme bei der Anwendung automatisierter Messsysteme hängen mit den speziellen Eigenschaften vor Ort zusammen, wie dem Zustand des Bauteils oder dem Wetter. Deshalb sind ein einfacher Aufbau und eine einfache Handhabung der Scansysteme wichtig. Eine möglichst hohe Messgeschwindigkeit ist immer erstrebenswert, um Kosten zu reduzieren und Behinderungen bei der Nutzung des Gebäudes oder Bauwerks zu minimieren.

Von großer praktischer Wichtigkeit ist die Wahl eines geeigneten Koordinatensystems. Das Koordinatensystem sollte sich konsistent über das gesamte Bauwerk erstrecken und möglicherweise angepasste Sub-Koordinatensysteme für einzelne Bereiche oder Bauelemente enthalten. Ursprung, Achsenrichtungen und Achseneinheiten sollten eindeutig festgehalten und zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abgesprochen sein. Da die Messbereiche der automatisierten Messungen auf das vorgegebene Koordinatensystem eingemessen werden müssen, wären verteilte Vermessungspunkte eine große Hilfe. Fest eingebaute, elektronisch auslesbare *Tags* könnten zusätzliche Informationen über die Verhältnisse zwischen Haupt- und Subsystemen liefern.

2. Visualisierung

2.1 Beispiele

Die Dickenmessung der Tunnelinnenschale von Fernstraßentunneln ist in Deutschland verpflichtend [9]. Die Messungen werden auf einem Raster von 0,80 m x 0,80 m ausgeführt, das auf 0,40 m x 0,40 m verdichtet wird, wenn Fehlstellen detektiert werden. Die Ergebnisse

sind blockweise als Tabellen und Höhenliniendiagramme darzustellen. **Bild 6** zeigt als Beispiel das Ergebnis einer manuellen Impakt-Echo-Messung (MFPA Weimar, [10]). Der Messbereich ist als Abwicklung in Untersicht der Tunnelinnenschale dargestellt, wobei die Fugen zu den anschließenden Blöcken im Bild oben und unten liegen. Die Farben stehen entsprechend der Farbtabelle für Dickenbereiche; der Farbwechsel von grün nach gelb markiert den Übergang zu Minderdicken (Nenndicke hier 40 cm). Im First ist nahe der oberen Blockfuge ein Bereich reduzierter Dicke zu erkennen. Graue Kreise markieren die Messpunkte und zeigen das verdichtete Raster im Bereich der Fehlstelle an.

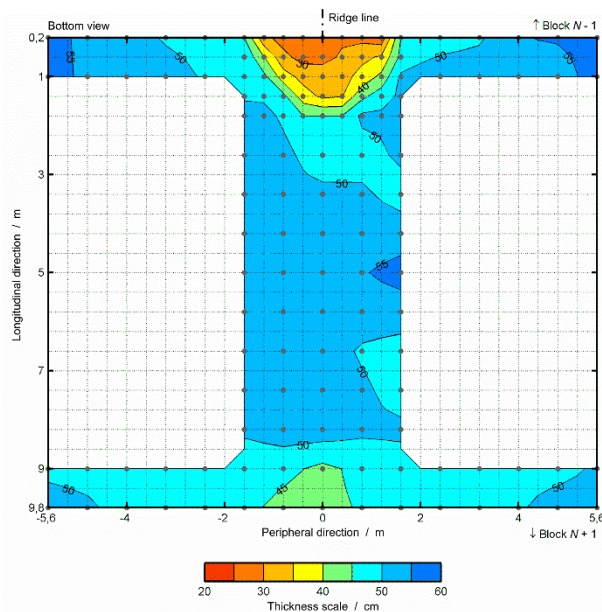


Bild 6. Impakt-Echo-Höhenliniendiagramm der Dicke eine Tunnelinnenschale (MFPA Weimar, [10])

Eine spezielle „4D“-Darstellung wurde an der University of Illinois at Urbana-Champaign entwickelt, um die Ergebnisse des luftgekoppelten Multi-Sensor-Impakt-Echo-Systems aus **Bild 1** darzustellen [2]. Nach der automatisierten Datenauswertung wird die Variation der Transparenz in den Bildern verwendet, um oberflächennahe Delaminationen anzuzeigen. **Bild 7** zeigt das Ergebnis einer halbautomatischen Datenerfassung eines 3,66 m x 25,6 m großen Bereichs einer Brücken-Fahrbahnplatte. Die dunklen Anzeigen repräsentieren defekte Bereiche, die roten Markierungen die Ergebnisse der Bohrkernentnahme, wobei rote Kreise Delaminationen ergaben.

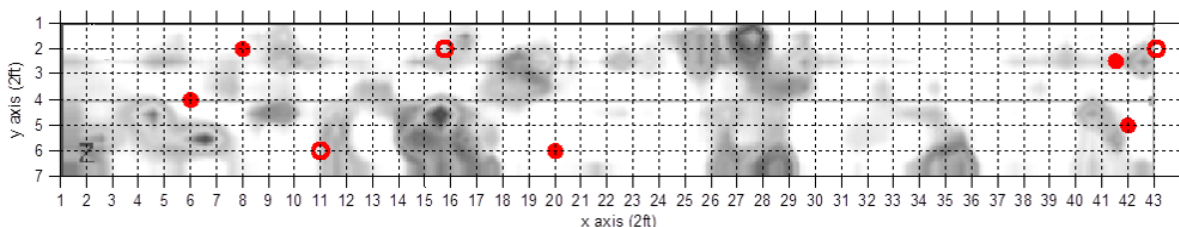


Bild 7. „4D“-Ergebnisdarstellung einer luftgekoppelten Impakt-Echo-Messung auf einer Brücken-Fahrbahnplatte (University of Illinois at Urbana-Champaign, [2])

Eine schnelle Übersicht über dreidimensionale Ergebnisse von Volumenabbildungen kann durch Isoflächendarstellungen erreicht werden. In **Bild 8** ist die CSAFT-Abbildung eines Betontestkörpers dargestellt, die vollautomatisch mit den FLEXUS-Scanner aus **Bild 2** gemessen wurde (MFPA Weimar, [4]). Das 3D-Bild besteht aus 185 2D-CSAFT-

Rekonstruktionen, die mäanderförmig auf fünf Spuren aufgenommen wurden. Jede CSAFT-Rekonstruktion beruht auf 120 Einzelmessungen des Ultraschall-Arrays, bei denen alle Sender-/Empfängerkombinationen der 16 Prüfkopfgruppen verwendet wurden. Das Bild zeigt die Rückwand, drei Rohre und zwei der drei Linsen, die im Testkörper verbaut wurden.

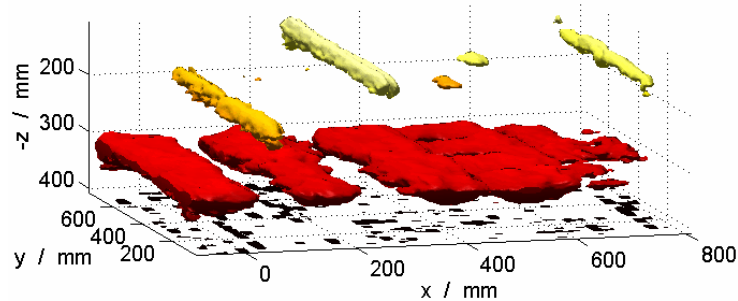


Bild 8. 3D-Isoflächendarstellung eines Betontestkörpers als Ergebnis von 2D-CSAFT-Abbildungen (MFPA Weimar, [4])

Die Methode der Ultraschall-Phasenauswertung kann verwendet werden, um zusätzliche Informationen in speziellen SAFT-Abbildungen darzustellen. In dem Beispiel in **Bild 9** wurde diese Technik angewendet, um Ablösungen von Spannkanälen in einer Kastenbrücke zu lokalisieren (BAM, Universität Kassel, [11, 12]). Die Messungen wurden mit einem automatisierten Scanner aufgenommen und mit der InterSAFT-Software ausgewertet. Das Betragsbild im oberen Bildteil zeigt deutlich den Verlauf der Spannkanäle. Ablösungen von Spannkanälen würden sich als erhöhte Betragsamplituden bemerkbar machen, jedoch ist die Interpretation in diesem Fall nicht eindeutig. Das Phasenbild im unteren Bildteil zeigt dagegen klar Ablösungen an zweien der Spannkanäle (grüne Farbgebung).

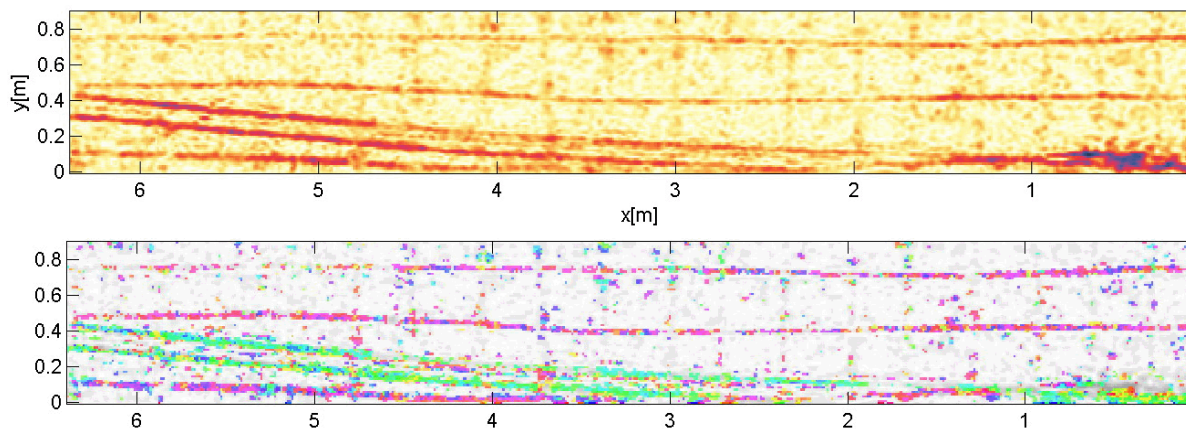


Bild 9. Tiefenschnitte durch Ultraschall-SAFT-Abbildungen von Spannkanälen: Betrag der Einhüllenden (oben) und Phasenbild (unten) (BAM, Universität Kassel, [12])

Building Information Modeling (BIM) ist eine Methode, um das Computermodell einer Bauwerksstruktur mit funktionalen Daten aus der Planung, Ausführung und Nutzung zu erweitern. Die funktionalen Daten können dann im CAD-(*Computer Aided Design*)-Modell des Bauwerks visualisiert werden, so dass Zusammenhänge und Abhängigkeiten sichtbar und für weitere Maßnahmen zugänglich werden. Dies lässt sich auch für Daten aus der Zustandsanalyse mit automatisierten Abbildungssystemen nutzen.

Bild 10 zeigt als Beispiel das Resultat einer Radar-Spannkanalortung in einer Brücke in Rosbruck, Frankreich, das in das 3D-CAD-Modell der Brücke integriert wurde (IZFP, [13]). Dieses Ergebnis ist Teil des französisch-deutschen Projektes CURE MODERN für das Monitoring von Bauwerken und kulturellen Monumenten.

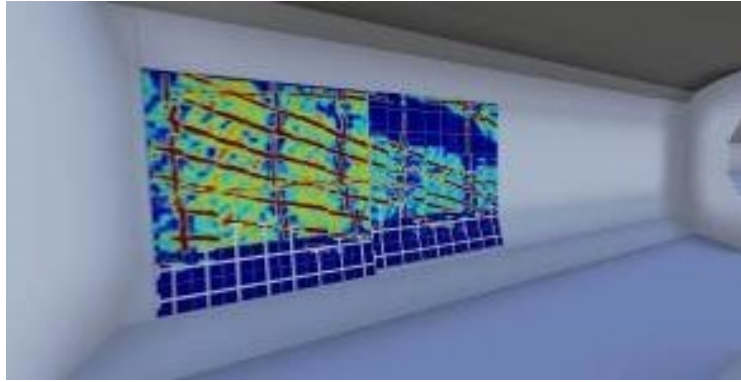


Bild 10. *Building Information Modeling: 3D-CAD Modell einer Brücke mit überlagerten Radardaten einer Spannkanaalortung (IZFP, [13])*

2.2 Probleme und Konsequenzen

Visualisierte Daten besitzen als Bilder eine hohe scheinbare Überzeugungskraft. Je nach Verfahren und Anwendung ist jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass die gezeigten Daten tatsächlich der zugrundeliegenden Objekteigenschaft entsprechen, unterschiedlich. Abbildungsverfahren können immer auch Artefakte hervorrufen, manche Verfahren geben nur qualitativ mögliche Problembereiche an. Dies ist zum Beispiel bei der Kombination oder Weiterverarbeitung der Daten und auch bei der Wahl der Farbtabelle bei der Darstellung zu berücksichtigen. Generell können Messergebnisse quantitativ, qualitativ, stochastisch, statistisch oder deskriptiv sein, was jeweils andere Methoden der Verarbeitung und Darstellung erfordert. In dreidimensionalen Isoflächendarstellungen beeinflusst der gewählte Schwellenwert stark das wahrgenommene Resultat. Der Schwellenwert sollte daher mit Vorsicht und am besten nach objektiven Kriterien [14] eingestellt werden.

Der Kernpunkt der Visualisierung ist die Daten so darzustellen, dass ihre Interpretation vereinfacht wird und Eigenschaften der untersuchten Struktur erkannt werden können. In einem Prozess der Merkmalsextraktion werden dann Anzeigen in den Bildern in Eigenschaften realer Objekte transformiert. Dabei ist häufig die Kombination von Messergebnissen unterschiedlichen Ursprungs oder die Hinzunahme externer Informationen z. B. aus Plänen hilfreich.

3. Verwendung der Daten für das Qualitätsmanagement

Der Übergang von einer Fehlerdetektion auf Fall-zu-Fall-Basis zu einem Qualitätsmanagement aufgrund von Zustandsdaten erfordert eine breitere Perspektive als die heute übliche Sicht. Da ein Qualitätsmanagement auf regelmäßiger Qualitätssicherung basiert, ist es notwendig große Datenmengen aufzunehmen, die automatisierte Messsysteme mit überschaubarem Aufwand auch gleichzeitig für verschiedene Messverfahren liefern können. Automatisierte Abbildungssysteme vereinfachen den Prozess des Messaufbaus, der Durchführung und der Auswertung bei ähnlichen Messaufgaben. Die standardisierten Ergebnisse sind weiterer Auswertung z. B. zur Wartungsplanung oder Lebensdauerabschätzung leichter zugänglich.

Um für das Qualitätsmanagement effektiv nutzbar zu sein, müssen automatisierte Mess- und Abbildungssysteme in eine komplexe Struktur eingebunden sein. **Bild 11** zeigt technische Bestandteile eines Qualitätsmanagementkonzeptes, die teils notwendige Voraussetzungen sind, teils optional durch Einbeziehung automatisierter Abbildungssysteme neue Möglichkeiten eröffnen.



Bild 11. Technische Bestandteile eines Qualitätsmanagementkonzeptes unter Einbeziehung automatisierter Abbildungssysteme

Die technischen Bestandteile sind im Einzelnen:

- **Prüfgerechte Konstruktion**
Berücksichtigung der Prüfbarkeit und der Erfordernisse automatisierter Abbildungsverfahren bereits bei der Planung; Anwendungsvorbereitungen wie Befestigungen, Führungen usw.
- **Einmessung**
Konsistentes Koordinatensystem über das gesamte Bauwerk mit Sub-Systemen; Einmesspunkte; elektronische *Tags*; 3D-Oberflächenaufnahme durch Laserscanner, Fotogrammetrie oder Infrarot-Tiefenaufnahme
- **Verfahrensauswahl**
Allgemein bekanntes und akzeptiertes Wissen über für eine gegebene Aufgabe geeignete Verfahren; Bewertung von Stärken und Schwächen der Verfahren unter verschiedenen Einsatzbedingungen
- **Verfahrensbeschreibung**
Einvernehmen über den Mess-, Auswerte- und Interpretationsprozess für vergleichbare Ergebnisse bei unterschiedlichen Ausführenden; Kalibrierung; Ermittlung der Messunsicherheit; ggf. Validierung; notwendige Ausbildung
- **Dateninterpretation**
Merkmalsextraktion zur Transformation der Bildanzeigen in reale Objekteigenschaften oder von stochastischen oder statistischen Daten in auffällige Bereiche; systematische Beschreibung nach katalogisierten Merkmalsarten; Handhabung unklarer Ergebnisse oder von Artefakten; menschliche oder algorithmische Interpretation
- **Datenfusion**
Fusion von Ergebnissen unterschiedlicher Verfahren mittels mathematischer Verfahren;

- Koordinatentransformationen
- Datenbanken
Katalogisierte Speicherung von quantitativen, qualitativen, stochastischen, statistischen oder deskriptiven Daten und Merkmalen, auch aus manuellen Messungen, Monitoring, Verkehrs-/Belastungsdaten und Zustandsbewertungen; Abruf und Verknüpfung
- *Building Information Modeling (BIM)*
Aufbereitung der Zustandsdaten der Datenbanken für BIM-Modelle zur Darstellung im geometrischen und funktionalen Kontext und zur Verbesserung von Zugänglichkeit und Interpretierbarkeit speziell für fachfremde Personen; Erkennen von Zusammenhängen und Abhängigkeiten
- Prognosemodelle
Modellierung des Bauwerksverhaltens basierend auf den Zustandsdaten der Datenbanken; Belastungssimulationen; Wartungsplanung; Lebensdauerprognose

Zur Etablierung eines Qualitätsmanagements muss ein formaler Rahmen für die verschiedenen Bestandteile des Qualitätsmanagements etabliert werden (**Bild 12**):

- Verfahrensbeschreibung
Prüfanweisungen für Messung und Auswertung, die einem Qualitätsmanagement unterliegen; Validierung von Verfahren, wo möglich
- Regulierung
Entwicklung von Merkblättern, Richtlinien und Normen, die die Hauptaspekte von Messsystemen, Messungen und Auswertung beschreiben (Beispiel: RI-ZFP-TU)
- Personaltraining
Formale Aus- und Weiterbildung der ausführenden und interpretierenden Personen nach anerkannten Standards; Zertifizierungssystem nach ISO 9712 [15].

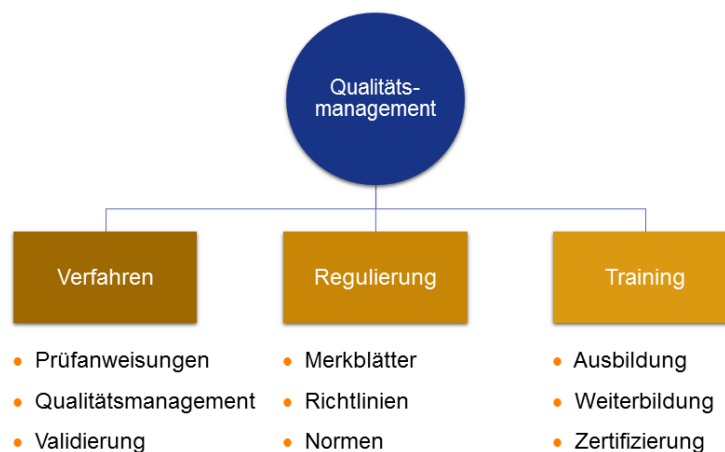


Bild 12. Bausteine zur formalen Umsetzung des Qualitätsmanagements

4. Zusammenfassung

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass automatisierte Mess- und Abbildungssysteme und Visualisierungsverfahren bereits heute zu einem Niveau entwickelt sind, das einen regulären Einsatz für die Zustandsanalyse von Betonbauwerken möglich macht. Diese und andere Systeme können einen wichtigen Beitrag zur regelmäßigen Qualitätssicherung leisten. Der Schritt zu einem Qualitätsmanagement der Bauwerke eröffnet weitere Nutzungsmöglich-

keiten der Daten im Rahmen von *Building Information Management* und von Prognosemodellen, die insgesamt zu einer Erhöhung der Sicherheit und einer Kostenoptimierung über die Gesamtlebensdauer führen können.

Einige technische Voraussetzungen erfordern noch weitere Entwicklungen, um den Einsatz der Verfahren zu vereinfachen. Diese werden im Zuge erhöhter Nachfrage selbsttätig erfolgen. Eine angemessene Visualisierung der Ergebnisse ist eine wichtige Voraussetzung für die effektive Dateninterpretation und Merkmalsextraktion, die die größten Herausforderungen bei der Auswertung automatisierter Messungen sind.

Der nächste Schritt ist die Etablierung eines formalen Rahmens für die verschiedenen Bestandteile des Qualitätsmanagements. Dies erfordert die Zusammenarbeit von Behörden, Anwendern und Systementwicklern sowie ein erhöhtes Interesse der Öffentlichkeit im Bauwesen.

Danksagung

Der Autor ist den folgenden Personen für ihre Beteiligung mit Arbeitsbeispielen und für Diskussionen sehr dankbar (in alphabetischer Reihenfolge):

Prof. Dr. N. Gucunski, Rutgers University; Herr N. Hallermann, Bauhaus-Universität Weimar; Dr. Th. Kind, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); Dr. M. Krause, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); Dr. J. Kurz, ehemals Fraunhofer Institut Zerörungsfreie Prüfverfahren (IZFP); Prof. Dr. G. Morgenthal, Bauhaus-Universität Weimar; Prof. Dr. J. Popovics, University of Illinois at Urbana-Champaign; Dr. N. Ryden, Lund Universität; Herr S. Schulze, Hupfer Ingenieure; Prof. Dr. A. Taffe, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW).

Referenzen

- [1] <http://www.dgzfp.de/Dienste/Publikationen?kategorie=Richtlinien>, last visit: 08.2015.
- [2] Oh, T.; Kee, S.H.; Arndt, R.; Popovics, J.S.; Zhu, J.: Comparison of NDT methods for assessment of a concrete bridge deck. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 139 (2013) 3, pp. 305–314.
- [3] Ryden, N.; Lowe, M.J.S.; Cawley, P.: Non-contact surface wave testing of pavements using a rolling microphone array. In: *Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09)*, Nantes, France, June 30–July 3, 2009.
- [4] Schickert, M.: Three-dimensional ultrasonic imaging of concrete elements using different SAFT data acquisition and processing schemes. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE)*, Boise, Idaho, July 20–25, 2014. AIP Conf. Proc. 1650 (2015), pp. 104–113.
- [5] Taffe, A.; Kind, Th.; Stoppel, M.; Kurz, J.H.: OSSCAR-Bauwerksscanner: Automatisierte Datenaufnahme von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom an Spannbetonbauteilen mit bildgebender Darstellung der inneren Konstruktion. *DGZfP-Jahrestagung 2011*, Bremen, 30.5.–1.6.2011. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerörungsfreie Prüfung, 2011, S. 1–8 (in German).
- [6] Gucunski, N.; Kee, S.; La, H.; Basily, B.; Maher, A.; Ghasemi, H.: Implementation of a fully autonomous platform for assessment of concrete bridge decks RABIT. *Structures Congress 2015*, Portland, Oregon, April 23–25, 2015, pp. 367–378.
- [7] Hussung, D.R.; Kurz, J.H.; Stoppel, M.: Automatisierte zerstörungsfreie Prüftechnik für großflächige Stahlbetontragwerke. *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012) 12, S. 794–804 (in German).
- [8] Hallermann, N.; Morgenthal G.: Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). In: *Proc. 7th IABMAS, Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety, and Management*, Shanghai, 2014, pp. 661–667.
- [9] RI-ZFP-TU: Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen. In: ZTV-ING, Teil 5: Tunnelbau, Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise, Anhang A. Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056 (2012), pp. 32–38 (in German).
- [10] Schickert, M.; Neisecke, J.; Brameshuber, W.; Colla, C.; Flohrer, C.; Gardai, A.; Große, Ch.; Krause, M.; Kroggel, O.; Krüger, M.; Willmes, M.: DGZfP Merkblatt B11 – A guideline describing

- fundamentals and applications of the impact-echo method. In: *Proc. NDTCE 2009*, Nantes, 30.6.–3.7.2009, pp. 807–813.
- [11] Krause, M., Mayer, K., Friese, M., Milmann, B., Mielentz, F. and G. Ballier, Progress in ultrasonic tendon duct imaging, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15 (2011) 4, pp. 461–485.
- [12] Schulze, S., Krause, M., Mayer, K., Redmer, B. and H. Wiggenhauser: Grouting defects localized by ultrasonic testing including phase evaluation. In: *Proc. ASNT Topical Conference NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology (SMT)*, Washington, DC, August 25–27, 2014, pp. 321–328.
- [13] Kurz, J.H.; Moryson, R.M.; Eschmann, C.; Burrier, G.; Chassard, C.; Wundsam, T.; Exner, J.-P.: CURE MODERN – Initiative moderne Bauwerksprüfung, Stadt- und Regionalplanung. In: *Schriftenreihe zum Symposium Grenzüberschreitende Infrastruktur – heute und morgen*, 2014, 14 S. (in German).
- [14] Jansohn, R.; Schickert, M.: Objective interpretation of ultrasonic concrete images. In: *7th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT)*, Copenhagen, May 26–29, 1998, pp. 808–815.
- [15] ISO 9712: *Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel*, 2012.