

# Das virtuelle Bauwerk – Kombinierte skalenübergreifende Visualisierung von ZfPBau Ergebnissen

Jochen H. KURZ\*

\* Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Campus E3 1,  
66123 Saarbrücken, Tel. 0681 9302 3880, Fax 0681 9302 11 3880,  
E-Mail [jochen.kurz@izfp.fraunhofer.de](mailto:jochen.kurz@izfp.fraunhofer.de)

**Kurzfassung.** Die Zustandserfassung und Schadensdiagnose an Stahl- und Spannbetonbauwerken mit zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) ist ein Bereich, in dem Informationen von verschiedenen Skalen für die Gesamtbewertung eines Bauwerks zusammengeführt werden müssen. Entwicklungen, die dem/der sachkundigen Planer/in Werkzeuge an die Hand geben, mit deren Hilfe umfassende und nachhaltige Bewertungen vorgenommen werden können, gibt es bislang nur ansatzweise. Jedoch sind mittlerweile die technischen Möglichkeiten gegeben, diese mehrskaligen Information zu erfassen und virtuell zusammenzuführen. Die Ansätze zur skalenübergreifenden Zusammenführung von ZfPBau Daten wurden beispielhaft im Rahmen eines Forschungsvorhabens, gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft und Wissenschaft des Saarlandes, untersucht. Einige Ergebnisse aus diesem Vorhaben werden im folgenden als eine Möglichkeit vorgestellt, verschiedene Untersuchungen in einem virtuellen Bauwerk zusammenzuführen. Es werden exemplarisch einige Teilaspekte einer Bauwerksaufnahme vorgestellt. Dies beinhaltet die optische Gebäudeaufnahme durch Befliegung mittels Mikrokooper, die automatisierte Multi-Sensor Datenerfassung, die Einbindung neuer Auswertansätze bei Multi-Sensor ZfPBau Anwendungen und die letztendliche Visualisierung von Prüfergebnissen auf verschiedenen Skalen in einem virtuellen Bauwerksmodell.

## 1. Einführung

Die Verbindung skalenübergreifender Informationen wurde explizit vor allen Dingen in der Multi-Skalen Simulation in den Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahren vorangetrieben [1]. Jedoch ist dies bei weitem nicht das einzige Feld, in dem die Verknüpfung mehrskaliger Informationen für das Verständnis zusammenhängender Prozesse von Bedeutung ist.

Bereits 2001 zeigte die Firma Statoil auf der Jahrestagung der European Geophysical Society eine sogenannte Cave zur dreidimensionalen Visualisierung von seismischen Daten aus der Erdölexploration [2]. Bei den Vorführungen war eine der Standardfragen, was die dreidimensionale Betrachtung seismischer Daten eines Erdölfeldes (in dem damaligen Fallbeispiel aus der Nordsee) bringt? Die Antwort lautete, dass Zusammenhänge besser erkannt werden, und so eine bessere Planung der weiteren Explorationsschritte möglich ist. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die Visualisierung ein Werkzeug zum phänomenologischen Verständnis von Zusammenhängen

ist [3]. Somit geht es darum, nicht-zufällige Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen aufzufinden. Dabei werden mit den heute in verschiedenen Bereichen zur Verfügung stehenden Datenakquisitionssystemen die Datensätze zunehmend größer und komplexer, d.h. die Herausforderung liegt darin diese so zusammenzuführen und darzustellen, dass Zusammenhänge einfach erkennbar werden. Bei einer Datenvisualisierung insbesondere bei in irgendeiner Form prozessierten Daten ist jedoch nicht auszuschließen, dass ein Verlust von Informationen auftreten und es dadurch zu Fehlinterpretationen kommen kann [3].

Die Zustandserfassung und Schadensdiagnose an Stahl- und Spannbetonbauwerken mit zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) ist ebenfalls ein Bereich, in dem Informationen von verschiedenen Skalen für die Gesamtbewertung eines Bauwerks zusammengeführt werden müssen. Entwicklungen, die dem/der sachkundigen Planer/in Werkzeuge an die Hand geben, mit deren Hilfe umfassende und nachhaltige Bewertungen vorgenommen werden können, gibt es bislang nur ansatzweise. Jedoch sind mittlerweile die technischen Möglichkeiten gegeben, diese mehrskaligen Information zu erfassen und virtuell zusammenzuführen.

Ein wesentliches Element ist hierbei der Einsatz automatisierter ZfP-Systeme. Hier gibt es eine Reihe von Beispielen, die zeigen, dass eine großflächige Datenaufnahme mit unterschiedlichen Messpunktdichten bereits möglich ist [4, 5, 6]. Dabei bleibt der automatisierte Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren bei Stahl- und Spannbeton nicht auf ein Verfahren beschränkt, sondern es kommen Multi-Sensor Systeme zum Einsatz. Ein aktuelles Haupteinsatzgebiet für ZfPBau sind Verkehrsinfrastrukturbauwerke [7, 8, 9], da hier die Verkehrssicherheit der Infrastruktur gewährleistet werden muss. Für eine umfassende Zustandserfassung und Schadensdiagnose können neben der immer geforderten visuellen Inspektion, je nach Sachlage, die Bestimmung geometrischer Elemente (geometrische Rekonstruktion), der Betondeckungsnachweis sowie Feuchte und Potentialfeldmessungen erforderlich sein. Bei Verkehrsinfrastrukturbauwerken handelt es sich hierbei meist um größere Flächen, die auch noch relativ verteilt auf einem Bauwerk liegen können. Zudem setzen sich die Ergebnisse dieser Untersuchungen aus Informationen von den verschiedenen Skalen eines Bauwerks zusammen. Diese Problematik bei der Zusammenführung der Ergebnisse hat bereits zu einer ersten Beispielanwendung von Werkzeugen aus dem Bereich Virtuelle Realität bei Brückeninspektion in den USA geführt [10]. Auch im Bereich Robotik zur visuellen Schadensaufnahme und Dokumentation gibt es neben [6] weitere Entwicklungen [11].

Die Ansätze zur skalenübergreifenden Zusammenführung von ZfPBau Daten wurden beispielhaft im Rahmen eines Forschungsvorhabens, gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft und Wissenschaft des Saarlandes, untersucht [12]. Einige Ergebnisse aus diesem Vorhaben werden im Folgenden als eine Möglichkeit vorgestellt, verschiedene Untersuchungen in einem virtuellen Bauwerk zusammenzuführen.

## **2. Kombinierte skalenübergreifende Visualisierung von ZfPBau Ergebnissen**

Infrastrukturbauwerke wie Parkhäuser und Tiefgaragen, aber auch Brücken und Industriebauwerke sind besonderen Belastungen ausgesetzt und unterliegen einem kontinuierlichen Alterungsprozess. Feuchtigkeit, Tausalz sowie wechselnde klimatische Bedingungen und die Abnutzung der Oberfläche der Fahrwege durch den Kfz Verkehr führen zur Degradation. Steigende Achslasten und klimatische Veränderungen haben in den letzten Jahrzehnten diesen Prozess verstärkt. Insbesondere bei Brücken kann festgehalten werden, dass je größer das Bauwerk, desto schlechter der Zustand, da in Deutschland im Mittel die größten Bauwerke gleichzeitig auch die ältesten sind. Die kumulierten

Folgekosten solcher Infrastrukturbauwerke können deren Anschaffungskosten um ein Vielfaches übersteigen. Dies gilt es frühzeitig durch entsprechende Lebenszyklusbetrachtungen zu berücksichtigen.

Mit einer präzisen und effizienten Analyse vorhandener Bauwerke ist eine umfassende Bestandsaufnahme möglich, mit einer daraus ableitbaren Priorisierung und daraus resultierend einem effizienten Ansatz zur Verwendung der vorhandenen finanziellen Ressourcen.

Komplexe Schädigungsvorgänge erfordern oftmals auch den Einsatz mehrerer Methoden. Zudem sind die Schäden an Infrastrukturbauwerken auf verschiedenen Skalen zu erfassen. Im folgenden werden exemplarisch einige Teilaspekte einer Bauwerksaufnahme vorgestellt. Diese beinhalten die optische Gebäudeaufnahme durch Befliegung mittels Mikrokooper, die automatisierte Multi-Sensor Datenerfassung, die Einbindung neuer Auswertansätze bei Multi-Sensor Anwendungen und die letztendliche Visualisierung von Prüfergebnissen auf verschiedenen Skalen.

### *2.1 Optische Bauwerksaufnahme*

Der erste Schritt bei der Erstellung eines Bauwerksmodells ist die optische Aufnahme. Hierfür konnten Erfahrungen zur visuellen Gebäudeinspektion unter Einsatz von unbemannten Flugplattformen gewonnen werden [12]. Sowohl hinsichtlich der Anforderungen und Ziele für eine punktuelle Schadens- oder Bauwerksaufnahme, als auch aufgrund des hohen Bebauungsgrads vor allem im innerstädtischen Bereich, fällt die Wahl auf VTOL-fähige (Vertical Take-Off and Landing), also senkrecht start- und landefähige, Flugplattformen. Bedingt durch den Bebauungsgrad und dem damit verbundenen Verkehr müssen ebenfalls die Risiken für Personen- und Infrastrukturschäden so niedrig wie möglich gehalten werden. Dementsprechend kommt dem Faktor Redundanz im Bereich der Einzelsysteme und auch des Gesamtsystems, also der Ausfallsicherheit flugwichtiger Funktionen, ein hohes Maß an Bedeutung zu. Als weiterer wichtiger Aspekt kommt auch die Forderung nach stabilen Schwebeflegeigenschaften zum Tragen, um eine geplante und detaillierte Bauwerksaufnahme gewährleisten zu können. Dabei hat sich gezeigt, dass die Nutzung eines Micro-UAVs – in diesem Fall eines Oktokopters – ein geeignetes Mittel für die zum Gebäude-Monitoring erforderliche Datenbasis darstellt [12]. Die an dem Fluggerät angebrachte, hochauflösende optische Kamera lieferte auch bei nicht optimalen Flugbedingungen teils auswertbare Ergebnisse und bestätigt damit, dass bereits die visuelle Aufnahmetechnik wertvolle Aussagen über den Bauwerkszustand erlaubt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen aus mehreren Einzelbildern zusammengesetzten Teil der Fassade des Fraunhofer IZFP Institutsgebäudes in Saarbrücken (Baujahr 1974).

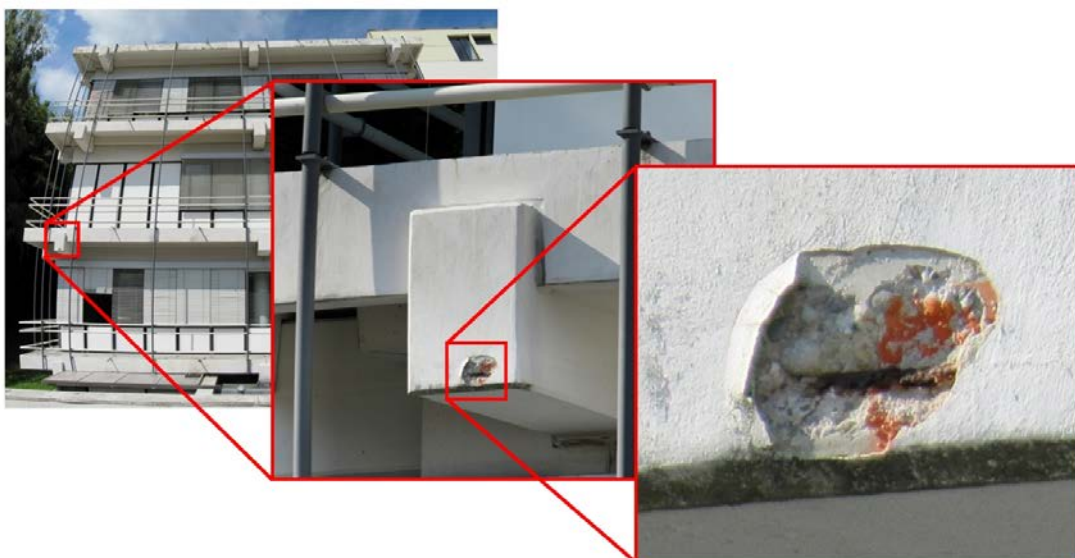
Das hier durchgeführte Verfahren der visuellen Gebäudeinspektion mittels UAV ist in zwei Prozess-Schritte aufgeteilt (2-Step-Prozess), und zwar der Datenakquisition (durch Befliegung, in-flight) und der digitalen Nachbearbeitung (post-flight). Zur Datenaufnahme wird die Kamera über eine automatische Foto-Auslösesequenz gesteuert, welche auf einer Frequenz von 1 Bild pro Sekunde eingestellt ist. Optional kann in die Kamerakontrolle auch manuell eingegriffen werden. Nach Abschluss der Gebäudebefliegung erfolgt als zweiter Schritt die digitale Nachbearbeitung ausgesuchter Bilder. Bedingt durch die automatische Auslösung der Kamera fallen pro Befliegung sehr hohe Datenmengen an; so werden bei einem knapp 17minütigen Flug rund 1000 Aufnahmen erzeugt. Zwar wird eine derart große Zahl an Aufnahmen nicht für die spätere Bauwerksaufnahme benötigt, jedoch entsteht durch den nicht vollkommen ruhigen Schwebeflug – bedingt durch nicht vollständig herausgefilterte Vibrationen der Plattform oder auch äußeren Einflüssen wie Windböen – ein relativ hoher Prozentsatz an qualitativ nicht verwendbaren Bilddaten. Im nächsten Schritt wird eine Bilderzeugung mittels einer Stitching-/Mosaikierungs-Software

durchgeführt. Diese arbeitet auf Basis einer Mustererkennung, welche gleiche Bildinhaltsstrukturen, sogenannte Matching Points, in zwei oder mehreren Bildern sucht und anhand dieser dann miteinander verknüpft. Allerdings ist hier noch Entwicklungsbedarf gegeben, da die bisher zur Verfügung stehenden Algorithmen nicht für die Verknüpfung von Bildern optimiert sind, die um alle 3 Raumrichtungen verkippt sein können. Somit sind derzeit teilweise noch Übergangssprünge oder Verzerrungseffekte erkennbar (Abb. 1).



**Abbildung 1.** Fotoaufnahme eines Teils des Fraunhofer IZFP Gebäudes in Saarbrücken. Das Bild wurde aus Einzelaufnahmen zusammengesetzt [12].

Ist eine Bilder-Datenbasis vorhanden, dient diese dann zum Aufbau eines digitalen Fassadenmodells (Abb. 1). Anhand eines derartigen Modells kann eine abschnittsweise durchgeführte Begutachtung der Gebäudefassaden erfolgen und auftretende Schäden können auch im Sinne eines Monitorings erfasst werden (Abb. 2).

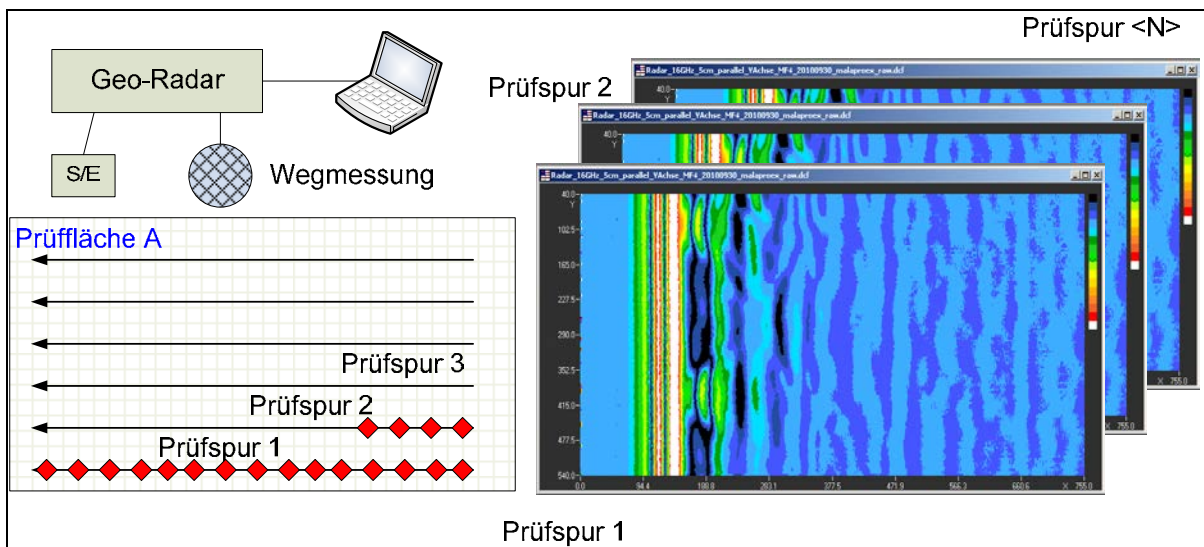


**Abbildung 2.** Detailbetrachtung einer Schadstelle am Fraunhofer IZFP Gebäude mittels einer Oktokopter Aufnahme [12].

## 2.2 Automatisierte Multi-Sensor Anwendungen

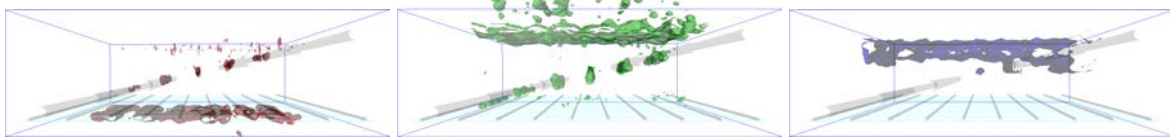
Neben einem digitalen Fassadenmodell, das die visuelle Inspektion dokumentiert, stellt die Zustandserfassung und Schadensdiagnose mittels automatisierter zerstörungsfreier Prüfverfahren die nächste Ebene der skalenübergreifenden Bauwerksanalyse dar. Mit Entwicklungen wie z. B. [4] und [6] ist eine automatisierte und großflächige Datenaufnahme möglich. Für die Verwendung verschiedener Prüfverfahren sind konzeptionell Vorkehrungen zu treffen, um auch eine Zusammenführung der verschiedenen Messdaten gewährleisten zu können.

Bei der Realisierung von Multisensorsystemen wird man bei der Auswertung der unterschiedlichen Messdaten vermehrt vor die Aufgabe gestellt, diese unterschiedlichen Strukturen und Informationsmengen miteinander zu fusionieren. An diesem Punkt setzen Abstraktionsebenen an. Technisch gesehen sind Abstraktionsebenen die großen Gleichmacher innerhalb einer Softwarearchitektur. Sie vereinen, in dem sie für die Gemeinsamkeiten der Informationsteile und für die Unterschiede eine einheitliche Sichtweise präsentieren (beispielhaft für Radar in Abb. 3). Ausgehend von einem bestehenden Datenformat wurden Abstraktionsebenen entwickelt, die zur Integration neuer Algorithmen in die Bestandssoftware dienen.



**Abbildung 3.** Prüfspuren und Radar B-Bilder als ein Beispiel für eine automatisierte großflächige Datenerfassung [12].

Für die Umsetzung von ZfP Ergebnissen in einem virtuellen Bauwerk wurden beispielhaft Ultraschall und Radardaten an einem Testkörper aufgenommen (Abb. 4). Der Probekörper wurde unter Verwendung von Normalbeton der Festigkeitsklasse C 30/37 mit einer Gesteinskörnung bis zu 32 mm-Größtkorn hergestellt. Die Prüffläche war 1,50 m x 1,50 m groß. Die Dicke betrug 0,50 m. Der Probekörper enthält sieben Stahlrohre (Außendurchmessern 43 mm, Wandstärke 2 mm) in unterschiedlichen Einbautiefen und eine Bewehrungsmatte, bestehend aus parallel und senkrecht angeordneten Stahlstäben mit 12 mm Durchmesser. Für die Radar-Messungen wurde eine 1,2 GHz-Antenne der Fa. MALA verwendet, bei Ultraschallecho wurde ein A1220-Prüfkopf der Fa. ACSYS angeregt mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz eingesetzt. Der Abstand der Ultraschall Messpunkte betrug 2,5 cm und die Ultraschall Messungen wurden von beiden Seiten des Probekörpers durchgeführt. Bei beiden Verfahren wurden die Daten mittels entsprechender Algorithmen rekonstruiert.



**Abbildung 4.** Von links nach rechts: US-Messdatensatz 1 (rot), US-Messdatensatz 2 (grün) und Radardatensatz (blau). Alle Datensätze sind als Iso-Flächen (Punkte mit gleichen Eigenschaften) visualisiert. Ebenso ist die Lage der Bewehrung dargestellt [12].

Bei der Bestandsaufnahme oder der Qualitätssicherung von Ingenieurbauwerken aus Stahl- und Spannbeton ist verstärkt der Nachweis zu erbringen, dass die Bewehrungselemente eingebaut sind und ihre Lage den Anforderungen der geltenden Baurichtlinien entspricht. Dabei sind zwei Bewehrungsgruppen von Interesse. In einer Tiefe von 3 bis 6 cm unter der Betonoberfläche ist die Rissbreiten beschränkende Bewehrung (meist Stabstahl) eingebaut. In größeren Einbautiefen befindet sich die, für die Aufnahme der erwarteten Lasteinwirkungen entscheidende Bewehrung. Bei Spannbeton zählen dazu auch Spannglieder. Mit Hilfe der zerstörungsfreien Prüfverfahren Radar und Ultraschallecho können diese Bewehrungselemente detektiert werden. Da die Verfahren auf unterschiedlichen physikalischen Grundprinzipien basieren, ist für die Lösung anspruchsvoller Prüfaufgaben der komplementäre Einsatz beider Verfahren sinnvoll. Für die effektive Nutzung der komplementären Information sind nicht nur die maximal möglichen Detektionstiefen von Interesse, sondern auch die Genauigkeit bei der Ermittlung der Detektionstiefen bzw. bei der Ermittlung der Betondeckungen über den Bewehrungselementen [12].

### 2.3 Virtuelle Bauwerksmodelle

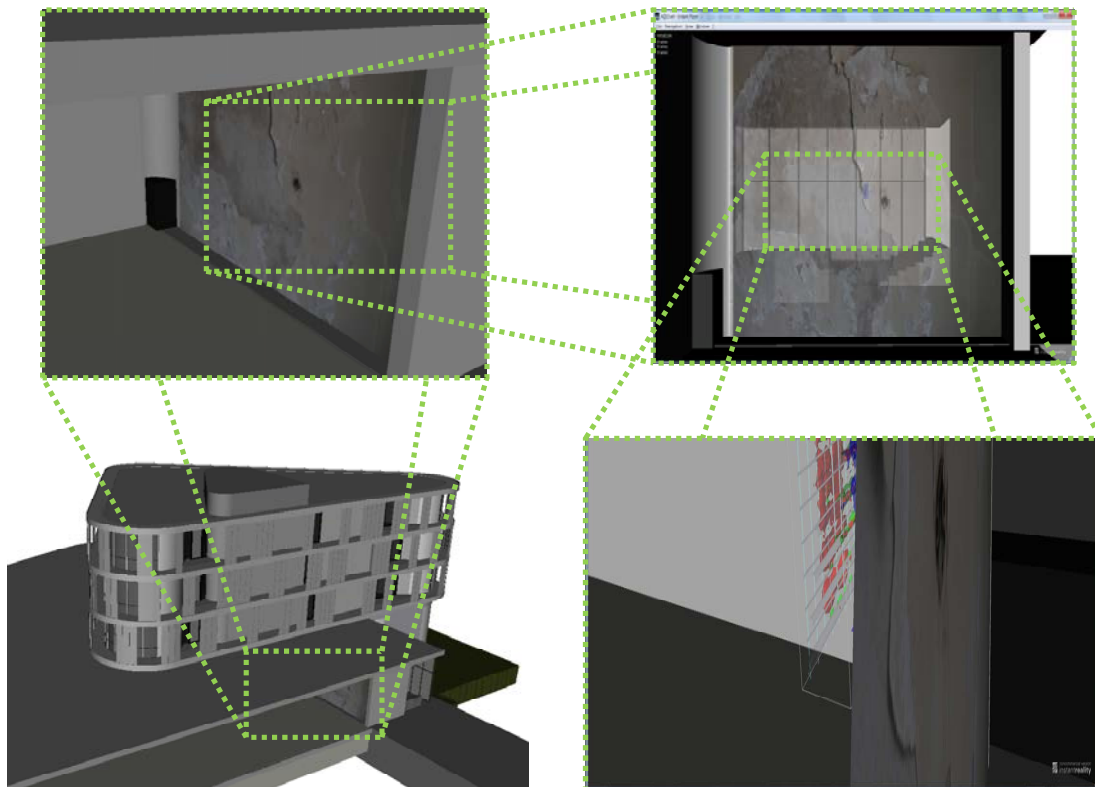
Wie bereits Eingang von Abschnitt 2 beschrieben erfolgt eine Bauwerksprüfung auf mehreren Ebenen. Falls es keine Sonderanforderungen oder Bedingungen gibt, wird mit einer Sichtprüfung begonnen, und zwar auf der höchstmöglichen Ebene. Je nach der Größe des zu untersuchenden Objektes, Typ und Ausmaß der potenziellen Befunde kann die Untersuchung z.B. auf der Makroebene anfangen, dann auf einer (oder mehreren) Mesoebene/n weitergehen und mit Untersuchungen auf der Mikroebene abgeschlossen werden. Dabei ist immer darauf zu achten, dass auf niedrigeren Ebenen gefundene Schäden immer auch auf den höheren Ebenen zu markieren sind. Hier werden exemplarisch die Visualisierungsmöglichkeiten für die beschriebenen Messdaten auf den verschiedenen Ebenen umgesetzt. Die Daten wurden zuerst für eine vorhandene Visualisierungssoftware angepasst und einzeln - jedes Verfahren für sich - visualisiert. Es wurde ein modular aufgebautes System für die Unterstützung der Auswertung konzipiert und (zum Teil aus vorhandenen Modulen) prototypisch implementiert. Im Rahmen einer Mehrskalensimulation wurden dann diese Messwerte und die optische Gebäudeaufnahme des Fraunhofer IZFP AQS Neubaus (Abb. 5) in einem CAD Modell beispielhaft überlagert. Das Ergebnis ist ein virtuell begehbare Gebäude, in dem auf den verschiedenen Skalen Messergebnisse dargestellt und so Zusammenhänge besser beurteilt werden können (Abb. 6).

Zustandserfassung und Schadensdiagnose im Hochbau und bei Ingenieurbauwerken erfordert die Messwertaufnahme auf mehreren Skalen mit einer entsprechenden zusammenhängenden Visualisierung. Bislang erfolgt dies nur in Form von Einzelmessungen und der Gesamtzusammenhang muss quasi „imaginär“ vom sachkundigen Planer erstellt werden. Anhand der vorgestellten Daten wurde exemplarisch gezeigt, welche Möglichkeiten sich bei der Messwertaufnahme mit zerstörungsfreien Prüfverfahren auf verschiedenen Skalen ergeben. Die großflächige und automatisierte zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen ist ein internationaler Arbeitsschwerpunkt. Damit

kommen auch Aufgaben zur Verwaltung und Bereitstellung dieser größer werdenden Datenmengen sowohl auf die Forschungseinrichtungen aber insbesondere auf Ingenieurbüros und Planer zu. Ein neues Element ist die mehrskalige Visualisierung der Messdaten. Die Werkzeuge sind hierfür mittlerweile so weit entwickelt und teilweise auch standardisiert, dass eine Umsetzung möglich ist. Entwicklungen auf dem Bereich der Tablet PCs und Anwendungen der Kinect Konsole von Microsoft haben gezeigt, dass hier aktuell eine Reihe zukunftsreicher Entwicklungen starten. Die Anforderungen an die Visualisierung zerstörungsfreier Prüfdaten im Bauwesen gehen aber über die einfache Darstellung hinaus. Es gilt die Genauigkeiten der erzielten Ergebnisse und die Ortsreferenzierung zu berücksichtigen.



**Abbildung 5.** Fraunhofer IZFP: Gebäudemodell (Links) und Foto (rechts) des AQS Neubaus [12].



**Abbildung 6.** Projektion der Beispieldaten in das virtuell begehbare Modell des Fraunhofer IZFP Gebäudeteils [12].

### 3. Fazit

Die Zustandserfassung und Schadensanalyse eines Bauwerks spielt sich auf verschiedenen Skalen ab. Die Zusammenführung dieser Informationen ist in Form eines virtuellen Bauwerksmodells möglich. Die Techniken der „Virtuellen Realität“ sind eine Sammlung von Verfahren, Geräten und Techniken die eine Modellwelt oder eine Videosequenz so realistisch (oder realitätsnah) visualisieren, dass der Betrachter das Gefühl bekommt, er ist mitten im Geschehen. Die Realitätsnähe hat verschiedene Stufen, die durch unterschiedliche, technische Mittel und Ansätze realisierbar sind. Die Eingangsdaten für die Erstellung eines Bauwerksmodells können mittels visueller Bauwerksaufnahme z. B. mit unbemannten Flugplattformen gewonnen werden. In solch ein Modell lassen sich dann weitere Daten z. B. von zerstörungsfreien Prüfungen integrieren. Aufgrund der Fortschritte im automatisierten Einsatz von Systemen zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen ist es möglich, auch auf dieser Ebene flächendeckende Messdaten in virtuelle Bauwerksmodelle zu integrieren. Somit ist die Verknüpfung von Informationen auf verschiedenen Skalen eines Bauwerks möglich.

Der Anwendungsbereich für solche Modelle ist vielfältig. So kann durch die Wiederverwendbarkeit eines einmal erstellten Modells dieser Ansatz auch als ein Werkzeug zum Bauwerksmonitoring verwendet werden. Auch für die Erstellung sogenannter Geburtszertifikate von Bauwerken könnte dieser Ansatz verwendet werden. Allerdings ist bei der Verwendung solcher Modelle über längere Zeiträume die langperiodische Verwendbarkeit der digitalen Daten zu gewährleisten.

### 4. Danksagung

Der Großteil der hier vorgestellten Arbeiten wurde im Rahmen des Projekts „Moderne Bauwerksprüfung für Bestandsbauten“ (Förderkennzeichen 12/2010) gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft und Wissenschaft des Saarlandes durchgeführt. Weiterhin haben folgende Kollegin und Kollegen an diesem Vorhaben aktiv mitgewirkt und ihre Ergebnisse, die auch in diese Veröffentlichung einfließen, in den gemeinsamen Abschlussbericht eingebracht: Dr. Nikolay Avgustinov, Prof. Dr. C. Boller, Dipl.-Ing. Christian Eschmann, Dipl.-Ing. Ralf Moryson, Dr. Christoph Sklarczyk, Dipl.-Ing. Doreen Streicher.

### Referenzen

- [1] Pippan, R., Gumbsch, P. (Hrsg.), 2010. Multiscale Modelling of Plasticity and Fracture by Means of Dislocation Mechanics. CISM Courses and Lectures, Vol. 522, Springer, 394 S.
- [2] Persönliche Korrespondenz. European Geophysical Society XXVI General Assembly, Nice 2001
- [3] Lehmann, D. J., Albuquerque, G., Eisemann, M., Tatu, A., Keim, D. Schuhmann, H., Magnor, M., Theisel, H., 2010. Visualisierung und Analyse multidimensionaler Datensätze. Informatik Spektrum. 33 (6), 589-600.
- [4] Taffe, A., Kind, T., Stoppel, M., Kurz, J. H., 2011. Bauwerkscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. Beton- und Stahlbetonbau. 106, 2011, 4, 267-276.
- [5] Dobmann, G., Kurz, J.H., Taffe, A., Streicher, D., 2010. Development of automated non-destructive evaluation (NDE) systems for reinforced concrete structures and other applications. In: Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Volume 2: Non-destructive testing methods, Maierhofer, Reinhardt, Dobmann (eds), 2010 Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge, ISBN 978-1-84569-950-5, 30-62.
- [6] M. Stoppel, A. Taffe, K. Reichling, J.H. Kurz, 2009. Zustandsermittlung und Schadensdiagnose für Parkhäuser mit automatisierten zerstörungsfreien Prüfverfahren. Beton- und Stahlbetonbau, 10/2009, 690-694.



- [7] Alampalli, S., Jalinoos, F., 2009. Use of NDT Technologies in US Bridge Inspection Practice. In: Technical Focus NDT of Bridges. Materials Evaluation. 67 (11), 1237-1246.
- [8] Moon, F., Aktan, E., Jalinoos, F., Jin, S., 2009. Leveraging Technology for Performance Based Bridge Engineering. In: Technical Focus NDT of Bridges. Materials Evaluation. 67 (11), 1248-1256.
- [9] Arndt, R. W., Kee, S.-H., Schumacher, T., Algernon, D., 2011. Strategien der Bauwerkserhaltung von Autobahnbrücken in den USA. Bautechnik. 88, S. 793-804.
- [10] Jáuregui, D. V., White, K. R., Pate J. W., Woodward, C. W., 2005. Documentation of Bridge Inspection Projects Using Virtual Reality Approach. Journal of Infrastructure Systems. 11 (3), 172-179.
- [11] Lim, R. S., La, H. M., Shan, Z., Sheng,, W., 2011. Developing a Crack Inspection Robot for Bridge Maintenance. In: Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China. 6288-6293.
- [12] Kurz, J. H., Boller, C., 2011. Moderne Bauwerksprüfung für Bestandsbauten – Abschlussbericht. Gemeinsamer Bericht von: Dr. Nikolay Avgustinov, Dipl.-Ing. Christian Eschmann, Dr. Jochen H. Kurz, Dipl.-Ing. Ralf Moryson, Dr. Christoph Sklarczyk, Dipl.-Ing. Doreen Streicher. Gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft und Wissenschaft des Saarlandes (Förderkennzeichen 12/2010), 57 Seiten.