

## Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben

Sicherstellung der Ausführungsqualität  
an Neu- und Bestandsbauten aus Beton  
durch innovative zerstörungsfreie Prüfung

Projektleiter: Dr. Martin Krause

Mitarbeiter: Matthias Behrens, Kerstin Borchardt, Dr. Ute Effner,  
Boris Milmann, Marcus Schubert, Jana Thierling und Jens Wöstmann  
BAM, FB 8.2 Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren

Leiter: Dr.-Ing. Klaus Mayer

Mitarbeiter: Mohammad Ibrahim  
Universität Kassel, Fachgebiet Theorie der Elektrotechnik und Photonik

November 2017

**BAM-Nummer** 8.2 Vh 8206

**Förderer** Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7.14.14 / F20-13-1-149)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

# 1 Aufgabenstellung

Allgemein gesagt ist die Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen die Feststellung des aktuellen (inneren) Zustands von Bauteilen und der Abgleich mit dem Sollzustand, wie er sich aus dem Bauplan und den aktuellen statischen Anforderungen an das Bauteil / Bauwerk ergibt. Nicht selten sind die Planunterlagen ungenau, unvollständig oder gar nicht verfügbar, so dass eine Überprüfung der relevanten Anforderungen an die Abmaße von Betonbauteilen (Dicke, Form, Bewehrungsausführung) notwendig wird. Bei Neu- und Umbauten können zerstörungsfreie Prüfverfahren dazu eingesetzt werden, die planungsgemäße Ausführung zu validieren (Qualitätssicherung).

Ultraschallechoverfahren für Betonbauteile werden in den letzten fünfzehn Jahren zunehmend im Bauwesen eingesetzt. Für alle diese Aufgaben gibt es bereits erfolgversprechende Anwendungen in der Praxis, insbesondere von Ingenieurbüros, die über die entsprechende Technik verfügen.

In vielen Fällen ist eine bildgebende Darstellung der Ergebnisse mithilfe der Rekonstruktionsrechnung sinnvoll. Dabei wird, teilweise in Zusammenarbeit mit der BAM oder anderen Forschungs- und Prüfanstalten, die Synthetische Apertur Fokussierungstechnik (SAFT) eingesetzt. Üblicherweise wird dabei in drei Schritten vorgegangen:

- Testmessung am Objekt und Entscheidung, ob eine flächige Datenaufnahme zielführend ist
- Durchführung der flächigen Messung (mit Baustellenscannern, mit äquidistanten Handmessungen oder durch Einsatz eines Linearen Ultraschall-Arrays)
- Rekonstruktionsrechnung und bildgebende Auswertung einschließlich Bewertung (üblicherweise im Büro oder Labor)

Häufig sind dann noch in einem zweiten Einsatz ergänzende Daten aufzunehmen, um die ermittelten Aussagen zu validieren oder zu verbessern. Hier setzt das Forschungsvorhaben an.

Der zu erforschende Ansatz einer direkten bildgebenden Auswertung vor Ort gliedert sich in zwei Teile:

1. Weiterentwicklung eines Ultraschallmesssystems zur sofortigen, interaktiven Messung und Rekonstruktionsrechnung direkt am Objekt
2. Testanwendung dieses Systems an Bauteilen und Bauwerken und daraus resultierende Verbesserung in Richtung Praxistauglichkeit.

Das Forschungsvorhaben wurde arbeitsteilig von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Fachbereich 8.2) und der Universität Kassel (Fachbereich CEP) bearbeitet. Die beteiligten Ingenieurbüros und Geräteentwickler lieferten im Zuge des Vorhabens wichtige Praxisexpertisen und beteiligten sich an der Verfahrensentwicklung.

## 2 Arbeitspakete und Ablauf

Für den ersten Teil des Forschungsvorhabens wird das Ultraschallecho-Verfahren auf Basis der existierenden Ultraschallprüfköpfe mit Punktkontakt-Ankopplung für die manuelle Datenaufnahme an Betonbauteilen in Bestands- und Neubauten baupraktisch erweitert, so dass eine direkte Aufnahme der Positionsdaten erfolgt und die Messergebnisse unmittelbar vor Ort bildgebend dargestellt werden.

Dafür wird die Rekonstruktionsrechnung dahingehend erweitert, dass die Messdatenaufnahme nicht an eine Vorgabe eines äquidistanten Messrasters gebunden ist, sondern die Echodaten von beliebig gewählten Messpunkten rekonstruiert werden können.

Das interaktiv rekonstruierte Bild liefert dann dem Anwender direkt vor Ort fundierte Aussagen über das zu untersuchende Messobjekt. Durch eine erweiterte Auswertung in interessanten Bereichen, z.B. durch engmaschigere Messpunkte, kann die Prüfaussagen so je nach Bedarf kumulativ verbessert werden. Es wurde in Betracht gezogen, dass Rekonstruktionsmethoden, die auf der synthetischen Apertur basieren, nur dann funktionieren, wenn über die zu evaluierende Fläche hinreichende Informationen aus verschiedenen Richtungen vorliegen, was bei der manuellen Datenerfassung von Anfang an mit wenigen Messpunkten nicht der Fall ist. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Signalanalysemethoden implementiert, mit dem Ziel, an einzelnen Messpunkten so früh wie möglich die Charakteristik der Streuprozesse zu bestimmen und die Ergebnisse bei der Bildgebung einbeziehen zu können.

Durch Untersuchungen an Betonprobekörpern in der Entwicklungsphase werden der jeweilige Stand der Hard- und Software und deren Zusammenspiel getestet sowie Optimierungspotentiale ermittelt. Im zweiten Teil des Vorhabens wird das neue System an bereits existierenden Probekörpern getestet und optimiert. So früh wie möglich sollte das neue Mess- und Auswertesystem an geeigneten Bauwerken in Zusammenarbeit mit den beteiligten Ingenieurbüros angewendet werden. Daraus werden wichtige Rückschlüsse für die Optimierung des Systems erwartet. Zur strukturierten Umsetzung des Vorhabens gibt es 5 Arbeitspakete:

- O Literatur und Marktrecherche zur Positionserfassung
- A Positionserfassung und Datenübergabe an die Auswertesoftware
- B Unmittelbare Messergebnisdarstellung und Rekonstruktionsrechnung
- C Anwendungstests an Probekörpern
- D Messungen und Auswertung in der Praxis

Die Arbeiten erfolgen weitgehend wie im Antrag vorgesehen. Einschließlich einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung wurde das Vorhaben im April 2017 abgeschlossen. Nach dem ersten Treffen der begleitenden Arbeitsgruppe 2016 war der Zeitplan geringfügig modifiziert worden.

Als zusätzliches, im Antrag nicht vorgesehenes Modul für das Auswerteprogramm wurde die Möglichkeit implementiert, virtuelle (künstliche) Messungen zu simulieren und mit SAFT-Analysis auszuwerten (auch Virtualisierte Messungen genannt). Dabei werden aus einem vorhandenen, in äquidistantem Raster (z.B. mit einem Baustellenscanner) aufgenommenen Messdatenfeld mit dem Cursor an vom Operateur gewählten Punkten Messdaten „gepickt“ und mit dem Rekonstruktionsprogramm SAFT-Analysis kumulativ ausgewertet. Auf diese Weise können bereits existierende, äquidistant (z.B. mit Bauwerksscannern) aufgenommene Datensätze in die Anwendungstests des neuen Messsystems einbezogen werden.

In die Schlussphase des Projektes fiel der Beginn einer Bachelorarbeit der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), in der die Anwendungstests des neu entwickelten Verfahrens an Probekörpern und realen Bauteilen im Rahmen eingebunden und weitergeführt werden. Ergänzend zum Vorhaben wurde an der HTW zudem eine Bachelorarbeit im Fach Industriedesign durchgeführt, um Wege zur Verbesserung der Funktionalität und Nutzerfreundlichkeit eines möglichen innovativen Gerätes zu verbessern.

Im Laufe des Vorhabens fanden zwei Sitzungen der begleitenden Arbeitsgruppe statt, an denen die Forscher, die beteiligten Ingenieurbüros, zwei externe Experten und der Fachbetreuer des BBSR teilnahmen. Außerdem beteiligten sich die BAM und die U Kassel mit einem Beitrag an den Projekttagen des BBSR in Bonn im Juni 2016.

### 3 Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse

Die Arbeiten und Ergebnisse im vom BBSR geförderten Projekt „Sicherstellung der Ausführungsqualität an Neu- und Bestandsbauten aus Beton durch innovative zerstörungsfreie Prüfung“ konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung der bildgebenden Ultraschallprüfung.

Die Ergebnisse lassen sich in drei Abschnitte gliedern und zusammenfassen.

#### 3.1 Ultraschallecho mit automatischer Positionserfassung und Bildgebung (Basissystem)

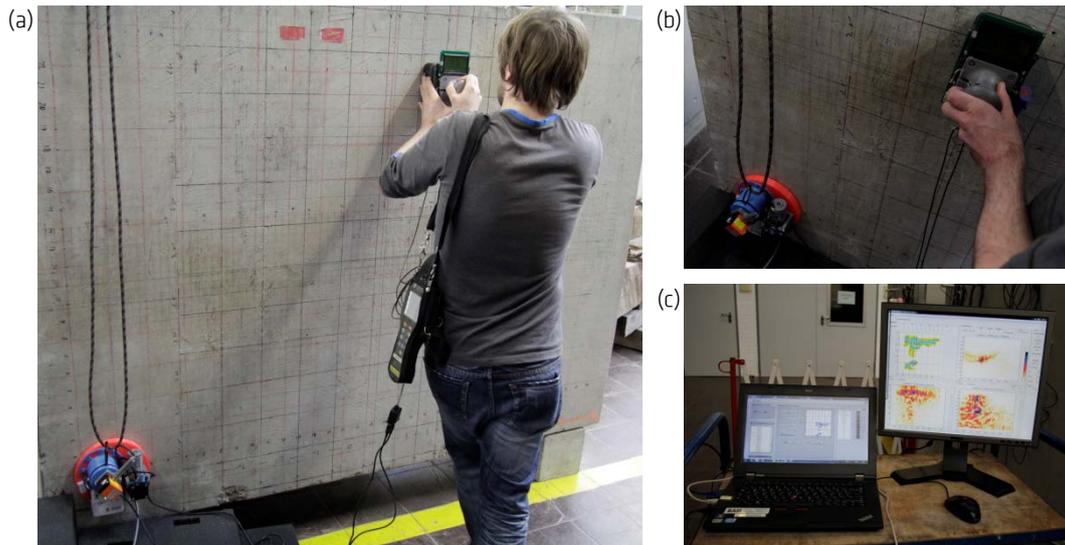
- Entwicklung und Bau eines Positionserfassungssystems für händische Ultraschallecho-Messungen mit Rekonstruktionsrechnung, bei der die jeweils aktuelle Position des Prüfkopfes erfasst und zusammen mit der dazugehörigen Ultraschallzeitkurve (A-Bild) dem Auswertesystem zur Verfügung gestellt wird (zunächst für Experimente in der Prüfhalle der BAM).

Als Positionserfassungssystem dient ein Seilzug mit zwei Winkelencodern. Aus diesen Elementen entsteht ein Messsystem, das bis zu einem Abstand von ca. 2 Metern von einer Basisstation die jeweils aktuelle Position relativ zu einem eingemessenen Bezugspunkt in Polarkoordinaten ermittelt und dem Auswertesystem in kartesischen Koordinaten zur Verfügung stellt. Dabei wird sowohl der Ort des Prüfkopfes als auch die Orientierung (Winkelausrichtung) des Prüfkopfes erfasst. Dies ist wichtig für die Kontrolle der Polarisation von Scherwellen-Prüfköpfen (Abbildung 1 und Abbildung 2).



**Abbildung 1: Komponenten des Positionserfassungssystems (UPS-Version 2.3)**

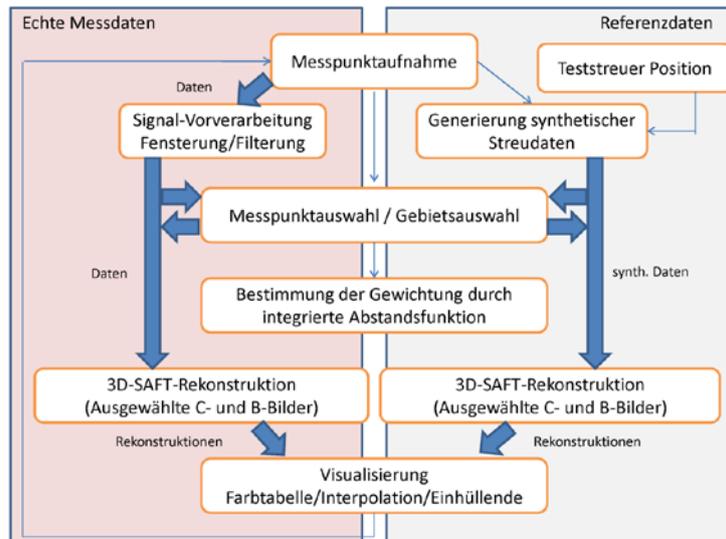
In der ersten Arbeitsgruppensitzung wird dieses System zur weiteren Anwendung im Rahmen des Vorhabens empfohlen, auch wenn erwartungsgemäß ein Seilzugsystem noch nicht das Optimum darstellt. Im Vordergrund steht jedoch die Entwicklung und Optimierung des Gesamtsystems und nicht die Suche nach der besten Positionserfassung. Es stellte sich außerdem im Laufe der Entwicklung heraus, dass die Winkeltreue des Positionserfassungssystems nicht für alle Winkel und Entfernungen zuverlässig funktioniert. Mit Berücksichtigung dieser Tatsache stellt das aber bei Beachtung der Randbedingungen für die Experimente und deren Bewertung keine Einschränkung dar.



**Abbildung 2: Anwendungstest an vertikaler Wand (USP-Version: 2.3). (a) Messsituation am Prüfobjekt, (b) Nahansicht zu den Hauptkomponenten des USP-Systems (Basisstation und Prüfkopfaufsatz), (c) Messrechner mit Positionserfassung-Software (linker Bildschirm) und online-Rekonstruktionsprogramm (rechter Bildschirm)**

Für eine Ultraschallanalyse wird das System händisch über die Betonoberfläche eines interessierenden Bauteilabschnittes geführt und punktweise eine Messung ausgelöst. Das Auswertesystem ermittelt mit einer Rekonstruktionsrechnung die im Volumen enthaltenen Reflektoren und stellt die Ergebnisse in geeigneten Schnitten am Auswerterechner unmittelbar dar. Für diese Berechnung wurde das Prinzip der SAFT-Rekonstruktion im Rahmen der Forschungsarbeiten für die Verarbeitung von beliebig verteilten Messpunkten ertüchtigt (ein äquidistantes Raster ist nicht erforderlich). Außerdem wird optional eine 1D Signalanalyse der Einzelmessung durchgeführt, mit dem Ziel flächige Streuer von punktförmigen oder regional begrenzten Streuvorgängen zu trennen, da diese Information wichtige Parameter für die nachfolgende SAFT-Rekonstruktion liefert.

Das Ergebnis eines jeden Messpunktes wird nach und nach dem Ergebnis der bereits vorhandenen Messpunkte hinzugefügt und kann online auf einem Monitor verfolgt werden. Durch sukzessive Messungen kann die Messung gezielt so lange verbessert werden, bis ein Aussage-Optimum erreicht ist. Um die Aussagefähigkeit der bereits gemessenen Daten zu charakterisieren wird parallel zur Rekonstruktion der Messdaten ein synthetischer Datensatz (Referenzdaten) generiert, der Signale von fiktiven Streuobjekten in dem zu untersuchenden Messgebiet an den durch die Messung vorgegebenen Positionen simuliert. Die Rekonstruktion dieser Daten wird mit den gleichen Rekonstruktions- und Darstellungsparametern optional angezeigt, sodass der Operateur ein Maß für die geometrischen Artefakte bekommen kann, die durch ein zu weites oder nicht optimales Messraster zwangsläufig entstehen müssen.



**Abbildung 3: Schema der Rekonstruktionsrechnung mit dem Einsatz von simulierten Referenzdaten**

Ein wichtiger Aspekt für die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messsystems ist es, eine Messstrategie für verschiedene Fragestellungen und Prüfaufgaben zu entwickeln. Um verschiedene Messansätze (Messlinien, Punktwolken, verschiedene Messpunktdichten) schnell vergleichen zu können, wird die oben beschriebene Methode der virtualisierten Messung mit hinterlegten Daten eingesetzt. Wenn also von einem zu untersuchenden Probekörper oder Bauteil die äquidistant aufgenommenen Echodaten vorliegen, können so verschiedene Messstrategien wesentlich effektiver durchgespielt und verglichen werden, als mit direkten Messungen am Bauteil.

Zudem eröffnet es die Möglichkeit, das neue Messsystem für reale baupraktische Fragestellungen zu testen, die bereits zu einem früheren Zeitpunkt vor Entwicklung der automatischen Positionserfassung aufgenommen worden waren.

### 3.2 Baustellentaugliches Messsystem

- Entwicklung und Bau einer baustellentauglichen Apparatur zur Weiterentwicklung und für Anwendungstests
- Technisches Design für einen ergonomischen Handscanner (Entwurf)

Um die Messungen in der Praxis zu beschleunigen und das System praxistauglicher zu gestalten, wurde in Zusammenarbeit mit einem Projektpartner ein robustes, spritzwassergeschütztes Gehäuse entwickelt, das zudem deutlich schneller betriebsbereit aufgebaut werden kann als die Laborapparatur. Damit wurden die wesentlichen Messungen an praxisrelevanten Probekörpern und Bauteilen erfolgreich durchgeführt (Abbildung 4).



**Abbildung 4: Baustellentauglicher Prüfkopfaufsatz (Neobotix). (a) Konstruktionsansichten, (b) Anwendungstest (UPS-Version 3.3), (c) Detailaufnahme zu Seilaufnahme / -verschluss und Auslösemechanismus**

Auf Initiative eines Experten der begleitenden Arbeitsgruppe wurden im Fachgebiet Industriedesign der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW) im Rahmen einer Bachelorarbeit der Handscanner und die Basisstation unter technischen, ergonomischen und konstruktiven Aspekten analysiert und entworfen (Abbildung 5). Dies eröffnet ein Weiterentwicklungspotenzial für zukünftige Anwendungen des Systems.



**Abbildung 5: Industrial Design**

### 3.3 Messungen an praxisrelevanten Bauteilen und Bauwerken

- Anwendung an ingenieurtypischen Fragestellungen zur Ortung und dem Zustand von Bewehrung und Spanngliedern sowie Ermittlung der Bauteilgeometrie
- Bewertung der Ergebnisse

Die von den beteiligten Ingenieurbüros eingebrachten Fragestellungen beziehen sich auf die Ortung und den Zustand von Bewehrung und Spanngliedern sowie auf die Bauteilgeometrie.

Mit der Methode der virtualisierten Messung auf der Basis hinterlegter äquidistant gemessener Datensätze lässt sich das neu entwickelte Mess- und Auswertesystem auch ohne direkte Messung am Bauwerk bewerten, wenn eine Messung mit gleichmäßigem Raster vorliegt. Die Daten müssen dafür nicht zwangsläufig von einer Scannermessung stammen, sondern können auch mit sorgfältig durchgeführten Handmessungen (A1220-Püfkopf oder Linear Array (Mira)) gewonnen werden. Die grundsätzliche Eignung dieser Vorgehensweise wird durch die Forschungsarbeiten bestätigt.

Mit dem neu entwickelten Mess- und Auswertesystem werden die deutlichsten Ergebnisse für die Ortung von Hüllrohren erzielt. Dies gelingt für Bewehrungsraster bis 15 cm eindeutig. Für Bewehrungsraster um 12 cm und weniger lassen sich aus den bisher vorliegenden Ergebnissen noch keine quantifizierbaren Ergebnisse ableiten.

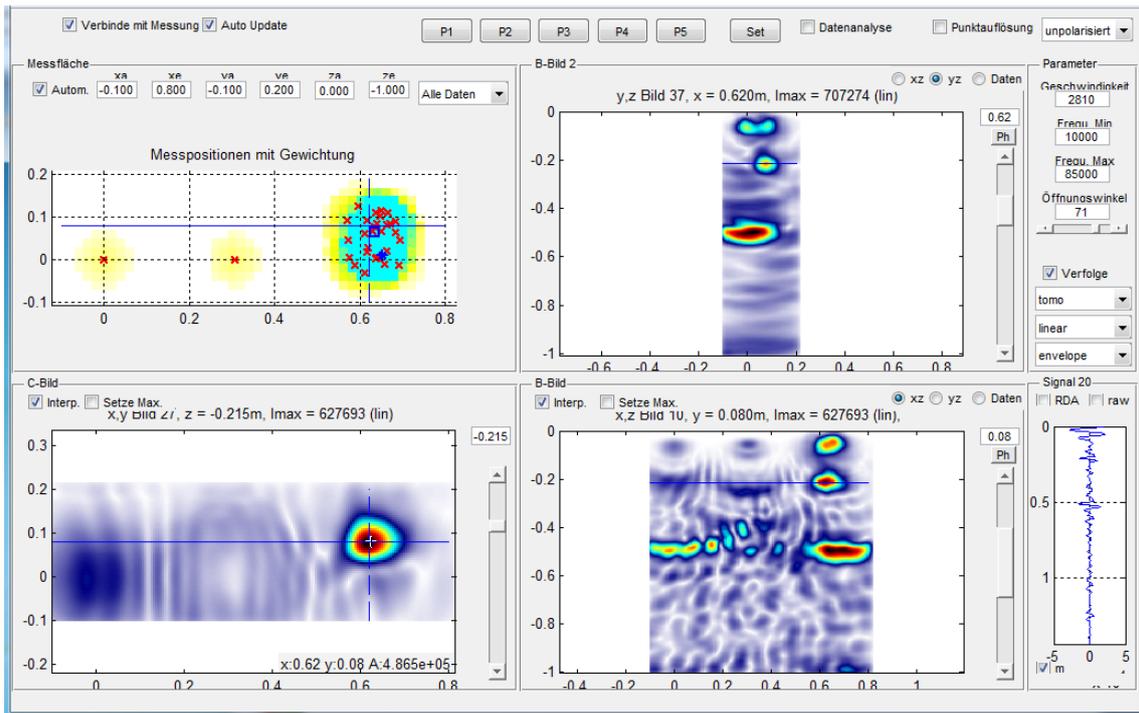
Die verifizierte Ortung von Auffälligkeiten in Hüllrohren wurde bisher an Probekörpern untersucht. Verpressfehler (Lufteinschlüsse in Richtung der Messfläche) lassen sich am Intensitätsunterschied der Reflexion feststellen. Die Phasenauswertung wurde für einige Beispiele angewendet, war aber kein vorrangiges Ziel in diesem Vorhaben.

Zur Untersuchung der Detektion und Ortungsgenauigkeit von kleineren Reflektoren liegen systematische Messungen an entsprechenden Probekörpern vor (als Beispiel hier: der Messaufbau dargestellt in Abbildung 6). Mit Linienmessungen lässt sich die Krümmung der Oberfläche abbilden.

Als Ergebnisbeispiel zeigt Abbildung 7 die Ortung einer Styrodurkugel (Durchmesser 80 mm) mithilfe der Aufnahme einer Punktwolke (screenshot vom online Auswerteprogramm *SAFT-Analysis* nach Abschluss der Messwertaufnahme).



**Abbildung 6: Anordnung der USP Apparatur zur Ortung der Styrodurkugel am FBS1.  
links: Anordnung der Apparatur mit Prüfkopf zwischen zwei Punktmessungen, im Hintergrund: Messstation  
mit Seilzug. rechts: Zwischenergebnis der Rekonstruktion auf dem Messrechner.**



**Abbildung 7: Lage der Kalibrierpunkte und der Messfeldkoordinaten für die in diesem Kapitel beschriebenen Messungen mit der automatischen Positionserfassung**

**links: Position der Messpunkte in Messfeldkoordinaten und SAFT-x,y-C-Bild in der Tiefe von  $z = -215$  mm  
rechts: SAFT y,z und x,z-Bilder entlang der links im C-Bild dargestellten Messfeldachsen  $x_m$  und  $y_m$**

## 4 Fazit

Mit der automatischen Positionserfassung und online-Rekonstruktion steht nun ein System zur Verfügung, das für Flächenbereiche in der Größenordnung von einem Quadratmeter zuverlässige Ergebnisse vor Ort liefert und für einen großen Teil der baupraktischen Fragen geeignet ist.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden die Grundlagen eines Ultraschall-Abbildungsverfahrens mit händischer Messung mit unmittelbarer Ergebnisdarstellung gelegt und das System für konkrete Prüfaufgaben, im Vergleich zu bereits vorliegenden Verfahren, bewertet.

Für die online-Ortung und Abbildung von Objekten und Fehlstellen, z. B. Spannkämen und Styrodurkugeln unterschiedlicher Größe wurden wegweisende Ergebnisse erzielt.

Für die komplexe Fragestellung, wie bereits bekannte Auffälligkeiten an der Rückseite von verpressten Hüllrohren in Probekörpern, wurden teilweise eindrucksvolle Ergebnisse erzielt. Wie gut sich solche Ergebnisse an unbekanntem Objekten reproduzieren lassen, bleibt zukünftigen Studien überlassen.

Eine häufige Fragestellung in der Baupraxis ist die Ermittlung der genauen Position von Spanngliedern. Hier ist der Aufwand der bildgebenden Rekonstruktionsrechnung gemäß Aussage der Projektpartner in den meisten Fällen nicht erforderlich, da die Linienführung der Spannglieder in einer Konstruktion durch Bauexperten auch ohne exakte Pläne angegeben werden kann. In der Regel ist zu erwarten, dass es dann ausreicht, mit den einfachen Handgeräten mit wenigen Linienmessung (B-Bildanzeige am Display) die genaue Position zu ermitteln.

Bei sehr dichter Bewehrung (Raster kleiner als 100 mm, Bewehrungsdurchmesser größer 25 mm) und/oder zusätzlicher Bügelbewehrung sollte diese Aussage mit entsprechenden Studien noch überprüft werden. Außerdem könnte das neue System eventuell sinnvoll für die Protokollierung eingesetzt werden.

#### *Nutzung des Systems für Potenzielle Anwender*

Die Software SAFT-Analysis wird über einen Link auf den Web-Seiten des Fachgebiets Computational Electronics and Photonics (CEP) an der Universität Kassel (<http://www.uni-kassel.de/eecs/fachgebiete/cep/research/projects.html>) zum Download zur Verfügung gestellt. Um Rückmeldungen und Anregungen von interessierten Anwendern wird gebeten.

#### **Ausblick**

Wie beschrieben, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine handgeführte Ultraschallecho Apparatur mit sukzessive erweiterbarer online-Bildgebung per Rekonstruktionsrechnung für den Baustelleneinsatz entwickelt, angewendet und bewertet. Die Ergebnisse zeigen ein großes Entwicklungspotenzial für wichtige Aufgaben der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung von Betonbauteilen.

Die Erfahrungen zeigen, dass zur Positionsbestimmung das verwendete Seilzugsystem nicht optimal ist. Es ist zu erwarten, dass das System bei einem Aufbau mit zwei Seilzügen und entsprechender Koordinatenermittlung insgesamt genauer arbeiten würde.

Für eine praxisgerechte Weiterentwicklung sollten aber auch andere Positioniermöglichkeiten in Betracht gezogen werden wie z.B. Laser-Distanzmessung, digitale Bilderfassung oder Sensor tracking.

Das entwickelte Rekonstruktionsprogramm SAFT-Analysis bietet - ebenso wie das Programmpaket Inter-SAFT der Univ. Kassel - die Option einer Phasenanalyse zur Unterscheidung von schallharten und schallweichen Reflektoren. Diese Möglichkeit konnte im vorliegenden Projekt bisher nur ansatzweise getestet werden und kann aus patentrechtlichen Gründen nicht in der veröffentlichten Software zur Verfügung gestellt werden. Eine fundierte Fortführung dieser sicherheitsrelevanten Fragestellung an Spannbetonkonstruktionen ist jedoch ein wichtiger Aspekt für die Fortführung der im vorliegenden Projekt begonnenen Ansätze.

Die Beachtung ergonomischer Kriterien, wie sie in den im Rahmen des Vorhabens realisierten Modellen aufgezeigt wurden, weist den Weg für eine wirklich praxistaugliche Apparatur. Es ist zu erwarten, dass mit der Anwendung der erreichten Ergebnisse weiterführende Entwicklungen folgen. Die Offenlegung der Software SAFT-Analysis möge das unterstützen.