

Ortung tiefliegender Bewehrung durch Ultraschall mit bildgebender Phasenauswertung

Rüdiger FELDMANN *, Andreas ZOEGA **, Boris MILMANN *, Martin KRAUSE *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 12200 Berlin

** DB Systemtechnik GmbH, Brandenburg-Kirchmöser

martin.krause@bam.de

Kurzfassung. Die Ortung von schlaffer Bewehrung in Beton erfolgt routinemäßig mit bildgebenden Radar- oder Wirbelstromverfahren. Die Anwendung dieser Verfahren ist aber begrenzt, wenn es sich um die Ortung tiefliegender Bewehrung (ab ca. 30 cm) oder um jungen Beton handelt. Grund ist die Schwächung der Radarpulse durch oberflächennahe Bewehrung oder durch die Betonfeuchte. Das bildgebende Ultraschallechoverfahren bietet den Vorteil, dass die Ultraschallpulse in diesen Fällen eine wesentlich höhere Eindringtiefe erreichen.

Im vorliegenden Beitrag wird eine Fallstudie vorgestellt, bei der mehrlagig eingebrachte Bewehrungseisen in einer nur einseitig zugänglichen 60 cm dicken Betonplatte geortet werden sollten, um eine Kernbohrung ohne Verkanten der Bohrkronen durchzuführen.

Zur Ortung der Bewehrung wurde das Ultraschallechoverfahren mit Scherwellen der Mittenfrequenz 50 kHz mit einem automatisch arbeitenden Bauwerksscanner eingesetzt. Aus den flächig aufgenommenen Messdaten wurde mit der Rekonstruktionsrechnung nach dem Prinzip der synthetischen Apertur (SAFT, Synthetic Aperture Focusing Technique) die Position der Bewehrungseisen bildhaft ortsgenau dargestellt. Dies gelingt mit einer Auswertungsoption, bei der die Phase der reflektierten Ultraschallpulse ermittelt und farbcodiert dargestellt wird (Phasenauswertung). Damit lassen sich Reflexionen der Bewehrung eindeutig von eventuellen Fehlstellen oder Rückwandeckos unterscheiden.

1 Einleitung

Für die bildgebende Ortung von Bewehrungseisen wird meist das Wirbelstromverfahren oder das Radarverfahren eingesetzt. Für das Wirbelstromverfahren gibt es solide, einfach zu bedienende Geräte am Markt. Mit dem Wirbelstromverfahren wird jedoch nur eine Eindringtiefe von 10 bis 15 cm erreicht. Mit dem Radarverfahren lassen sich präzise Abbildungen bis ca. 30 cm Tiefe erreichen, wenn der Beton nicht zu feucht ist oder nicht mehrere Lagen Bewehrung überwunden werden müssen. Das bildgebende Ultraschallechoverfahren erreicht eine größere Eindringtiefe [1][2].

In der vorliegenden Studie wird über einen Prüfeinsatz berichtet, bei dem in einer Betonplatte die rückseitige Bewehrung genau geortet werden sollte, um bei der für eine Reparaturmaßnahme einzubringenden Bohrung die Bohrkronen exakt positionieren zu können. Es handelt sich dabei um eine nur von unten zugängliche auf Bohrpfehlen stehende Bodenplatte, die nach Planunterlagen 60 cm dick ist. Nach Angaben des Bauwerkseigners



weist die Platte eine untere und obere kreuzweise verlegte Bewehrung mit einem Stabdurchmesser von 20 mm und einem Stababstand von 20 cm auf.

Die Platte wurde als Ortbeton auf eine Sauberkeitsschicht gegossen. Es war nicht möglich, die Sauberkeitsschicht von der Bodenplatte so abzutragen, dass eine für die Ultraschallmessung ausreichend glatte Oberfläche entsteht. Daher wurde entschieden, eine Spritzbetonschicht aufzutragen.

2 Verwendetes Messverfahren: Bildgebendes Ultraschallechoverfahren mit Phasenauswertung

Für die Messungen wird ein automatisierter Bauwerksscanner eingesetzt, der sich für die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen seit Jahren bewährt hat [1]. Gemessen wird dabei mit 50 kHz Scherwellenprüfköpfen. Bei Scherwellengeschwindigkeiten in Beton zwischen 2500 und 3000 m/s liegen die Wellenlängen um $\lambda = 50$ mm. In Bild 1 (rechts) ist ein kommerziell erhältlicher Sende/Empfangs-Messkopf abgebildet, der aus einzelnen Punktkontaktprüfköpfen (Bild 3, links) aufgebaut ist. Jeweils 12 Punktkontaktprüfköpfe sind parallel geschaltet und arbeiten als Sende- bzw. Empfangsarray. Durch die federnde Lagerung der einzelnen Prüfköpfe kann die Strahlergruppe koppelmittelfrei auch auf rauen Oberflächen eingesetzt werden.

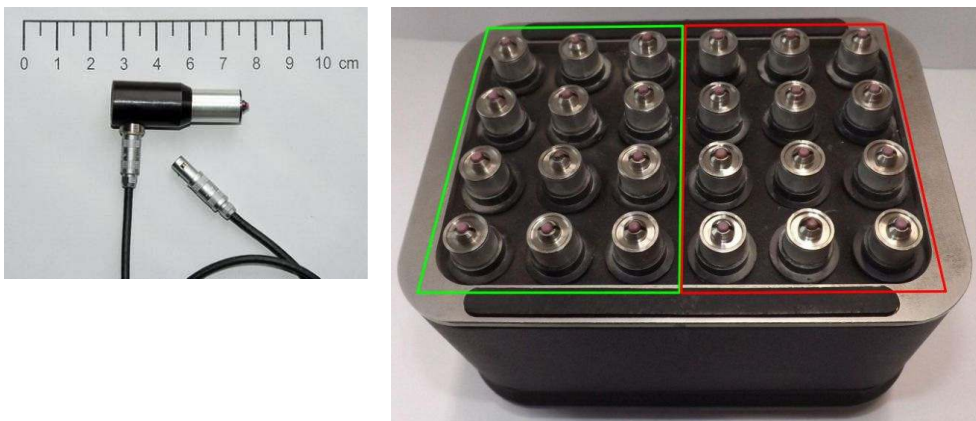


Bild 1 Punktkontaktprüfkopf (links) und Strahlergruppe (rechts), bestehend aus einzelnen Punktkontaktprüfköpfen (rot: Sendearray; grün: Empfangsarray).

Das Ergebnis einer einzelnen Ultraschallmessung mit einem Prüfkopf im Impuls-Echo-Verfahren ist ein Zeitsignal mit Echo-Impulsen, das sog. A-Bild, deren Amplitude dem Schalldruck proportional ist (s. Bild 2, links). Um die Aussagesicherheit bei Strukturuntersuchungen von Betonbauteilen zu verbessern, tastet man mit einem Prüfkopf die Oberfläche des Prüflings entlang einer Linie oder innerhalb einer Fläche ab. Die Darstellung erfolgt durch Aneinanderreihung der einzelnen A-Bilder zum sog. B-Bild, bei dem die y-Achse der Prüfkopfverschiebung entspricht und die z-Achse die Laufzeit bzw. umgerechnet die Reflektortiefe angibt. Bei einer zweidimensionalen Abtastung des Bauteils können aus den A-Bildern sog. C-Bilder (Schnittbilder parallel zur Oberfläche) abgeleitet und dargestellt werden. Diese Darstellungsmethoden nutzen lediglich die Information aus einer Zusammenschau vieler A-Bilder zur besseren Interpretation des Prüfergebnisses, sie verbessern aber nicht das Signal/Rausch-Verhältnis [3].

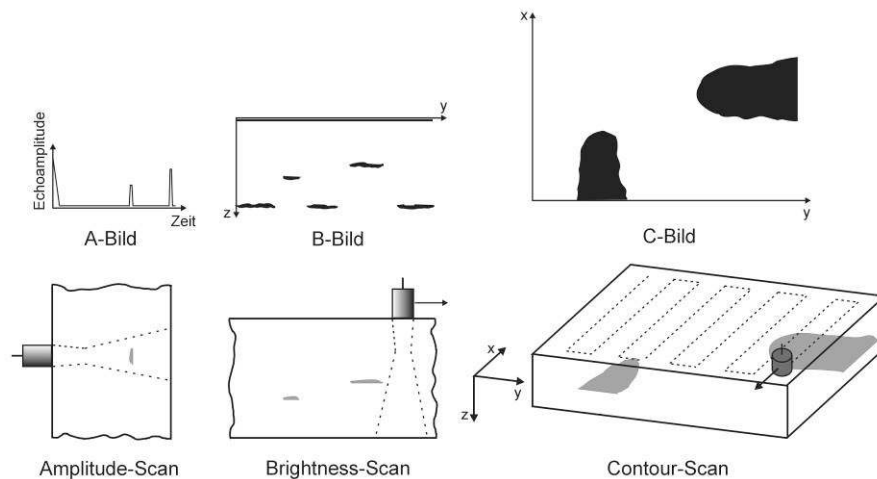


Bild 2 Abtastverfahren und Bilddarstellungen [3]

Für die Strukturuntersuchung von Betonbauteilen mit einseitiger Zugänglichkeit wird seit den 90er Jahren die synthetische Aperturvergrößerung entsprechend dem SAFT-Prinzip (Synthetic Aperture Focussing Technique) erfolgreich angewendet und damit die Aussagesicherheit von Messungen verbessert. Dabei muss man ein oder mehrere Prüfköpfe in vielen definierten Positionen an der Betonoberfläche ankoppeln. Die aus dem Volumen unter der Messfläche nacheinander aufgenommenen Reflexionsdaten werden dann rechnerisch bearbeitet. Einzelne Objekte werden fokussiert dargestellt.

Vereinfacht ausgedrückt werden bei der Rekonstruktionsrechnung alle an der Oberfläche gemessenen Reflexionssignale mit Kenntnis der Sende- und Empfangsposition und Annahme bzw. Kenntnis der Geschwindigkeit in kleine würfelförmige Elemente (Voxel) des beschallten Volumens zurückgerechnet, die nacheinander als mögliche Streuer betrachtet werden. Bei der phasenrichtigen Überlagerung dieser möglichen Streusignale erhält man dann an den tatsächlichen Reflektororten im Vergleich zu Orten ohne Reflektor große Amplitudenwerte. Speziell für Beton ist interessant, dass sich so auch eine Zeitbereichsmittelung ergibt, die das Signal-Rauschverhältnis verbessert (Unterdrückung des sogenannten Kornrauschens).

Die Ergebnisse eines größeren Messbereiches werden als 3D-Datensatz dargestellt (ähnlich wie in Bild 2, rechts) und die Ergebnisse als Schnitte aus diesem Datensatz dargestellt. Sie werden dann als SAFT-B-Bild und SAFT-C-Bild bezeichnet.

Zur Unterscheidung des Reflektortyps im Beton wird zusätzlich ein phasenempfindliches Auswerteverfahren angewendet. Damit kann zum Beispiel unterschieden werden, ob es sich bei einem Reflektor im Beton um Stahl (z. B. einen Bewehrungsstab) oder um Luft (z. B. eine Hohlstelle) handelt. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass reflektierte Ultraschall-Impulse einen Phasensprung von 180° , also einen Vorzeichenwechsel aufweisen, je nachdem, ob sie an der Grenzfläche zu einem akustisch dichteren oder dünneren Material reflektiert werden. Dieser Effekt ist streng genommen nur für die Reflexion von ebenen Wellen an ebenen, im Vergleich zur Wellenlänge dicken Reflektoren gültig. Für die in Betonbauteilen zu untersuchenden Reflektoren wie z.B. Spannbewehrung, Bewehrungsseisen und Lufteinschlüsse treten dabei aus verschiedenen Gründen Zwischenwerte auf [4].

Die Phasenlage eines solchen Streuvorganges kann dann im Rahmen der Rekonstruktionsrechnung durch die Verwendung des Maximums der Einhüllenden des Reflexionssignals aus den dreidimensional vorliegenden rekonstruierten Daten berechnet werden. Aus einem zusätzlich zum Intensitätsbild vorliegenden Phasenbild wird der Phasenwert des entsprechenden Reflektors über eine Farbcodierung abgelesen. Aus dem Vergleich des Phasenwertes benachbarter Reflektoren können dann Phasensprünge zwischen schallweicheren und schallhärteren Reflektoren identifiziert werden. Eine Anwendung

dieser Methode in Betonbauteilen ist die Identifikation von Lufteinschlüssen im Vergleich zu Einbauteilen aus Stahl [6][5]. Die Auswertung im Rahmen dieser Studie erfolgte mit einem interaktiven Rekonstruktionsprogramm, das über eine komplexere Phasenauswertung einschließlich dreidimensionaler Bildbetrachtung verfügt [6].

Bild 3 zeigt als Beispiel das Teilergebn einer flächigen Ultraschallechomessung eines Hüllrohrs mit absichtlichen Fehlverpressungen im sogenannten *Großen Beton-Probekörper* der BAM (GBP). Die verpressten und unverpressten Abschnitte unterscheiden sich eindeutig durch einen Phasenunterschied von ca. 170° (aus [4]).

Für die vorliegende Fragestellung wird die Phasenauswertung eingesetzt, um die Reflexion der rückseitigen Bewehrung (Eisen) von der Reflexion an der Rückwand (gegen Luft) zu unterscheiden.

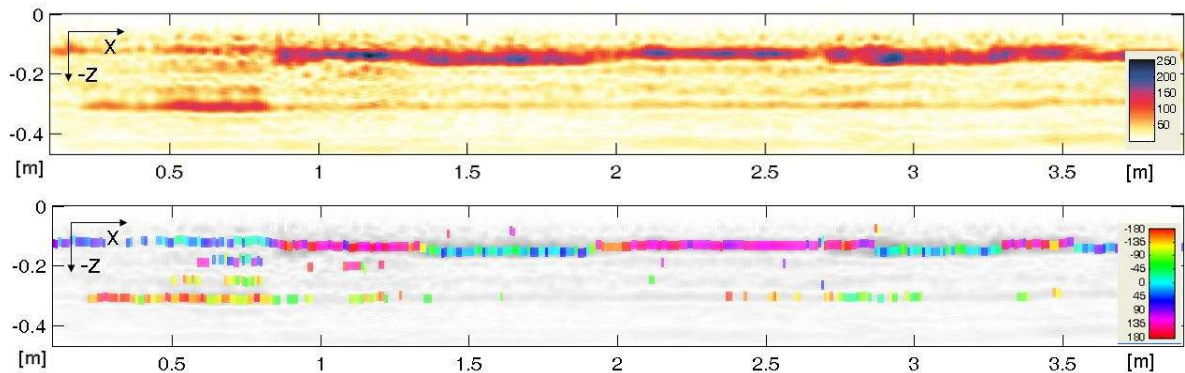


Bild 3 Rekonstruktion (SAFT-B-Bild) eines teilweise verpressten Spannkanals (\varnothing 40 mm, ca. 120 mm Betondeckung) in einer 30 cm dicken Betonplatte als Amplituden- (oben) und Phasendarstellung (unten)(analog [4])

Für flächige Messungen wird ein in der BAM (Fachbereich 8.2) entwickelter Bauwerksscanner mit wählbarem Messraster eingesetzt. Dieser Scanner besteht aus zwei kombinierten linear angetriebenen Vorschubeinheiten, die eine Aufnahmeeinheit für unterschiedliche Sensoren in x- und y-Richtung positionieren. Die Messkopfaufnahmeeinheit ist zur Ankopplung des Messkopfes an der Oberfläche mit einer Hubeinrichtung ausgestattet. Hieran können sowohl Ultraschallprüfköpfe für eine punktweise Ankoppelung oder auch andere Messsysteme montiert werden (siehe Bild 4). Die Befestigung des Scanners auf der Bauteiloberfläche erfolgt mit speziell entwickelten Saugfüßen. Diese erzeugen eine ausreichend hohe Haltekraft, sodass das System sowohl an einer Wandfläche als auch über Kopf an der Decke angebracht werden kann (siehe z.B. [1]).

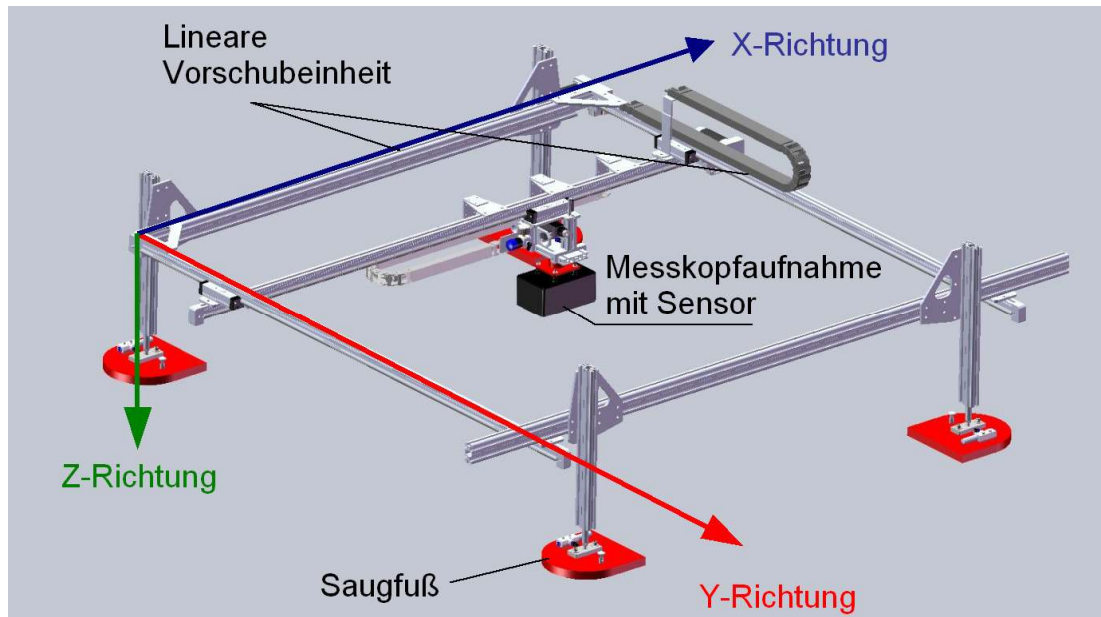


Bild 4 Schematische Darstellung des Baustellenscanners mit Saugfüßen (rot dargestellt) (aus [1])

3 Durchführung der Messungen

Auf der mit Spritzbeton vorbereiteten Oberfläche wurde ein Messfeld definiert. Auf diesem wurde das Ultraschallverfahren mithilfe des oben beschriebenen Scanners angewendet (siehe Bild 5). Zusätzlich wurden Handmessungen mit dem Radar-Verfahren durchgeführt. Mit dem Radarverfahren lässt sich schnell die oberflächennahe Bewehrung erkennen. Dies wurde genutzt, um den Verlauf der oberflächennahen Bewehrung aufs Bauteil zu übertragen. Aufgrund der geringeren Eindringtiefe ist es mit dem Radar-Verfahren jedoch nicht möglich, die rückseitige Bewehrung zu detektieren. Daher werden in diesem Beitrag nur die Ergebnisse der Ultraschallmessungen diskutiert.

Mit dem Scanner wurde ein 1,2 m x 1,2 m großes Feld mit dem Ultraschallverfahren in 2 Polarisationsrichtungen mit einem Punktabstand von 2 cm abgescannt.

Bei dem am Scanner verwendeten Ultraschallsystem handelt es sich um ein A1220 der Firma Acsys. Es wurde eine Pulsmittelfrequenz von 50 kHz gewählt.

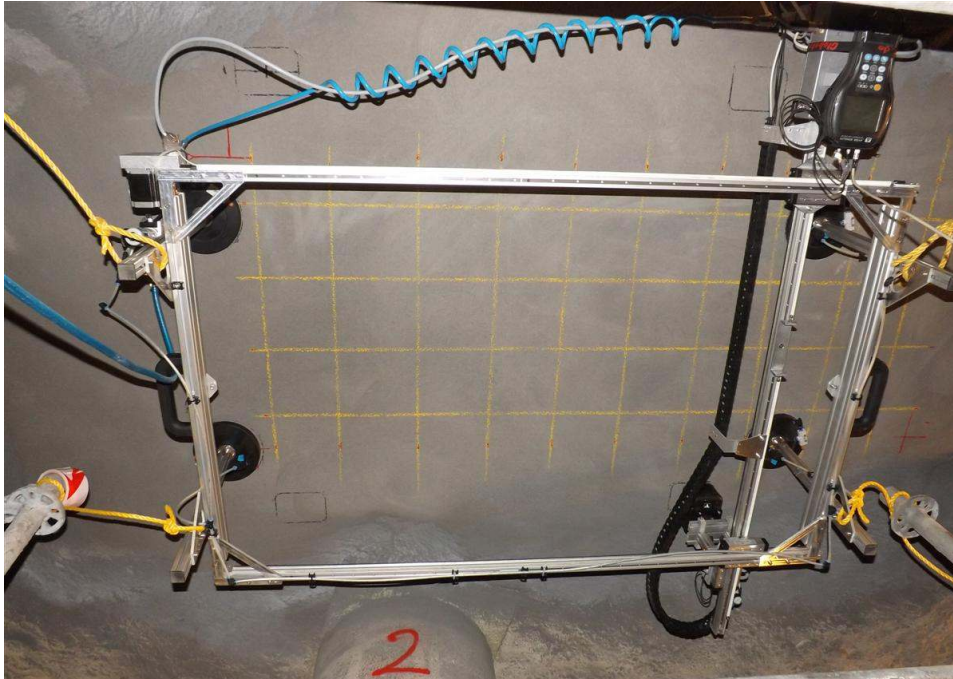


Bild 5 Scanner mit Ultraschallmesssystem festgesaugt an der Unterseite des Messobjektes.

4 Ergebnisse

Die mit dem Scanner aufgenommenen Ultraschalldaten wurden mit einem SAFT-Algorithmus rekonstruiert (Programm "InterSAFT" Universität Kassel [6]). Für die Rekonstruktionsrechnung wurde eine Scherwellengeschwindigkeit von 2700 m/s gewählt. Zur Interpretation der Ergebnisse wurden sowohl die Intensitätsdarstellungen als auch die Phasenbilder von oberflächenparallelen Schnitten betrachtet.

Nachfolgend sind die Ultraschallmessungen anhand zweier Ergebnisdarstellungen zusammengefasst. Die linken Abbildungen zeigen die Intensität des reflektierten Ultraschallsignals an. Hier bedeuten gelbliche Farben eine geringe Intensität der Reflexion und die Farben Rot bis Schwarz eine hohe Intensität. Die rechten Abbildungen zeigen den Phasenwinkel des reflektierten Ultraschallsignals.

4.1 Ergebnisse vordere Bewehrung

Die erste Bewehrungslage liegt horizontal in einer Tiefe von 11 cm. Die zweite, senkrecht dazu verlaufende Bewehrung befindet sich in einer Tiefe von 13 cm (Bild 6, links). Aus der Phasenauswertung ergibt sich für die Reflexion am Bewehrungsstahl, also zum akustisch dichteren Medium, Phasenwerte um 135° . (Bild 6, rechts)

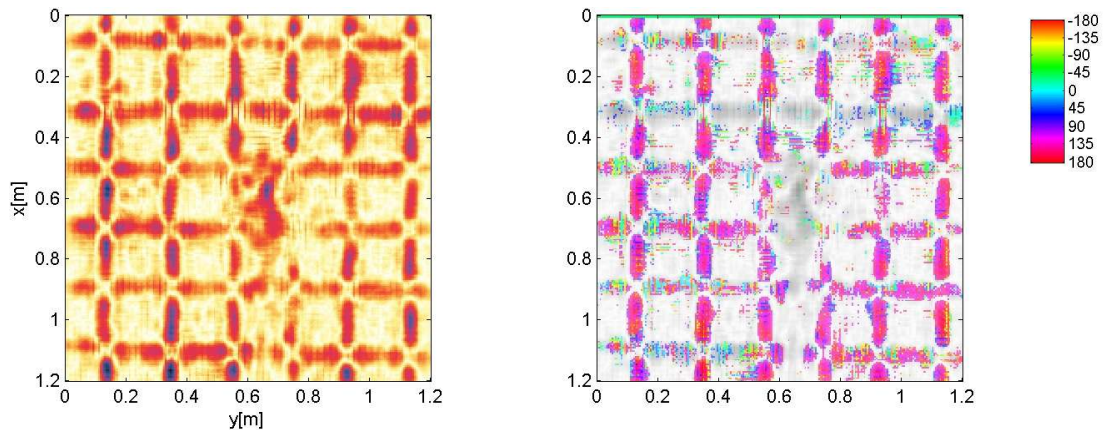


Bild 6 C-Bild (oberflächenparalleler Schnitt) in einer Tiefe von $z = 11$ cm
links: Amplitudenauswertung; rechts: Phasenauswertung

Die erste und zweite Bewehrungslage zeigen einen regelmäßigen Stababstand von ca. 20 cm.

4.2 Ergebnisse hintere Bewehrung

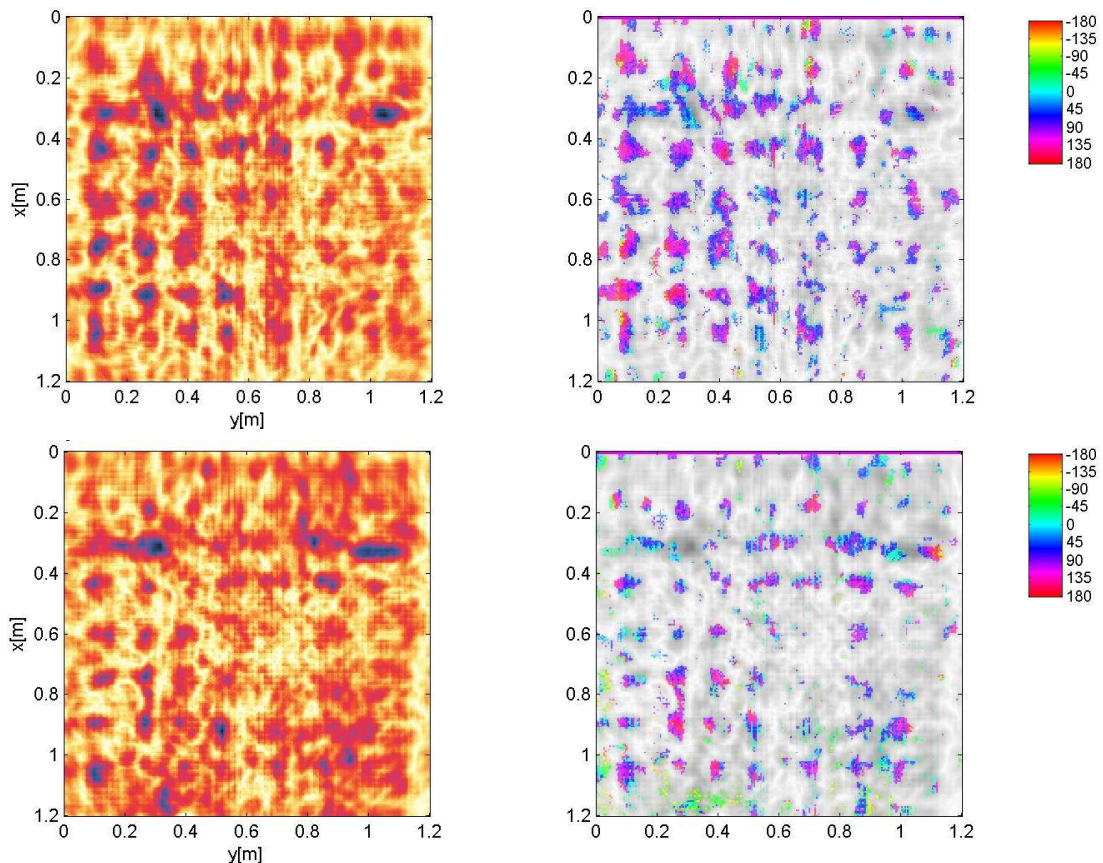


Bild 7 C-Bilder mit beiden Polarisationsrichtungen (oben, unten) in einer Tiefe von $z = 59$ cm
links: Amplitudenauswertung; rechts: Phasenauswertung

Für die hintere Bewehrung ist eine linienhafte Darstellung der Bewehrung nicht mehr gegeben. Sowohl in der Intensitätsdarstellung (Bild 7, links), als auch in der Phasendarstellung (Bild 7, rechts) ergeben sich regelmäßige Muster mit Stellen erhöhter Intensität. Diese Stellen weisen eine Phase auf, die zur einer Reflexion an einer Beton/Stahl Grenzschicht passt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich dieses Muster aus der Reflexion von der hinteren Bewehrung ergibt. Die C-Bilder aus den Messungen mit beiden Polarisationsrichtungen zeigen mit gewissen Intensitätsunterschieden beide dieses

Muster. Es lässt sich jedoch auch mit Kenntnis der Polarisationsrichtungen keine Präferenz für eine bestimmte Bewehrungsrichtung ausmachen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Stellen erhöhter Intensität die Kreuzungspunkte der senkrecht aufeinander verlegten rückseitigen Bewehrung markieren. Zur vollständigen Darstellung der hinteren Bewehrung wurden die Intensitäts-Maxima dieser Stellen bestimmt und darüber ein orthogonales Netz gelegt.

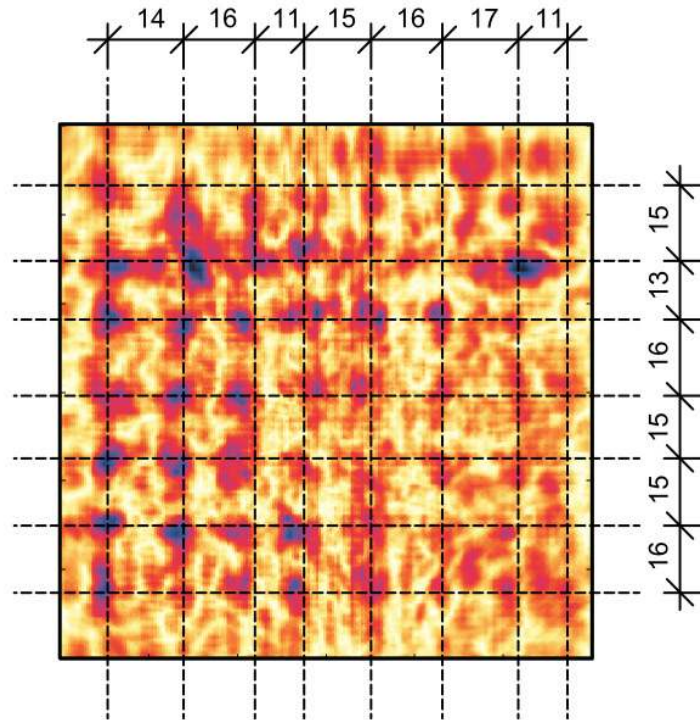


Bild 8 C-Bild mit Skizze der ermittelten Lage der hinteren Bewehrung

In Bild 8 ist zu erkennen, dass die Intensitäts-Maxima nicht exakt auf einer Linie liegen. Versucht man entlang der Maxima die Lage eines Bewehrungsstabes zu bestimmen, ergeben sich Ortungsunsicherheiten von mehreren Zentimetern. Auch ohne zentimetergenaue Bestimmung der Lage der Bewehrungsstäbe lässt sich jedoch deutlich erkennen, dass die Bewehrung entgegen den Angaben des Auftraggebers in beide Richtungen einen Abstand von ca. 15 cm aufweist.

Um zu überprüfen, ob es sich bei den Reflektoren in der Tiefe von 59 cm tatsächlich um schallhärtere Objekte (Stahl) handelt, ist im Bild 9 zum Vergleich das Amplituden- und das Phasenbild der Rückseite der Betonplatte gezeigt.

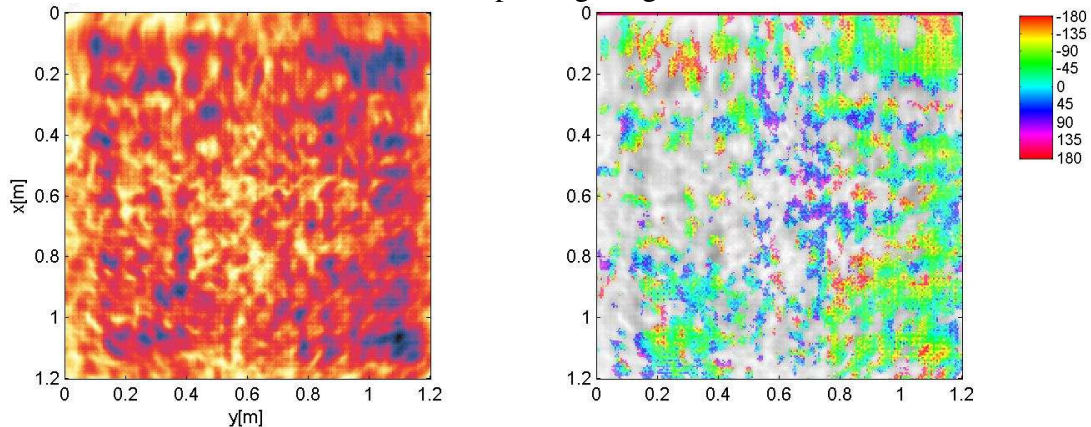


Bild 9 C-Bild in der Tiefe der Rückseite (71cm); links: Amplitudenauswertung; rechts: Phasenauswertung
Im Phasenbild (Bild 9, rechts) dominiert der Phasenwert -45° . Dieser entspricht hier der Reflexion an einem schallweicheren Medium (Rückseite der Betonplatte). In Bild 7, rechts

(oben und unten) dominieren dagegen Phasenwerte um 120° und weisen damit einen Phasenunterschied von ca. 170° im Vergleich zu einer Reflexion an einem schallweicherem Medium auf. Es kann also davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Reflektoren in der Tiefe von 59 cm um die rückseitige Bewehrung handelt.

4.3 Übertragung der Ergebnisse aufs Bauwerk

Die Markierung des Verlaufes der oberflächennahen Bewehrung erfolgte direkt nach den Radarmessungen vor Ort. Da die aufwändigere Auswertung der Ultraschalldaten erst im Büro erfolgte, konnte der Plan der rekonstruierten rückseitigen Bewehrung dem Auftraggeber nicht unmittelbar vor Ort übergeben werden (Bild 10).

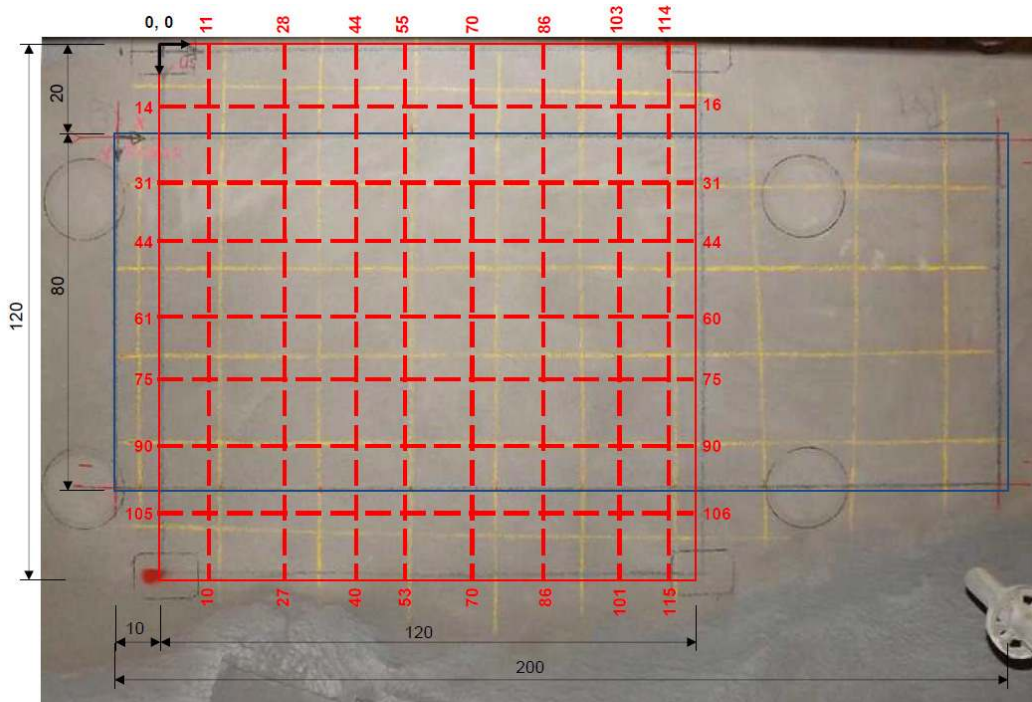


Bild 10 Übertragung der Messergebnisse auf die Bauteiloberfläche (gelb: Verlauf der oberflächennahen Bewehrung, rot: Verlauf der hinteren Bewehrung)

Der Auftraggeber hat den vermuteten Verlauf der rückseitigen Bewehrung später auf das Bauteil übertragen und sich auf dieser Grundlage für eine Bohrposition entschieden. Die Bohrung erfolgte ohne Schwierigkeiten. Ein tangenciales Anschneiden der Bewehrung wurde vermieden.

4.4 Verifizierung der Ergebnisse

Der Bohrkern wurde nach Abschluss der Reparaturmaßnahme vom Auftraggeber für eine Verifizierung der Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Die Länge des Bohrkerns entspricht mit 71 cm der gemessenen Rückwand. Die Ergebnisse sind demnach mit einer korrekten Scherwellengeschwindigkeit berechnet worden.

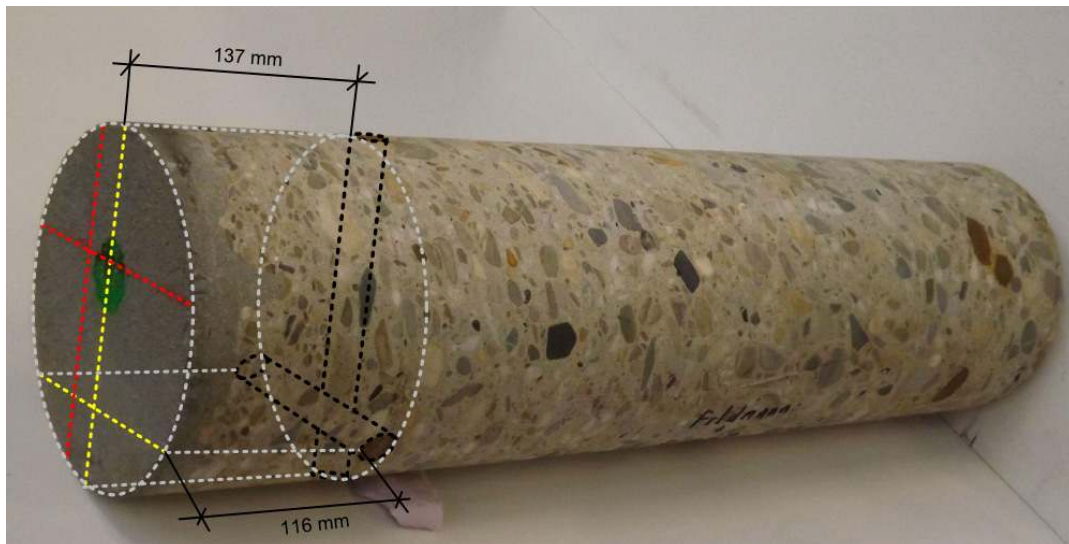


Bild 11 Bohrkern mit Markierung der vorderen Bewehrung. Gelb gestrichelt: Auf Oberfläche aufgezeichnete Lage der vorderen Bewehrung als Ergebnis der der Radarmessungen; Schwarz gestrichelt: Tatsächlicher Verlauf der Bewehrung

Wie in Bild 11 zu erkennen, stimmt die aufs Bauteil übertragene Markierung der oberflächennahen Bewehrung (gelb gestrichelt) mit den Bewehrungsstäben überein.



Bild 12 Bohrkern mit Markierung der hinteren Bewehrung. Rot gestrichelt: Auf der Oberfläche aufgezeichnete Lage der hinteren Bewehrung als Ergebnis der Ultraschallmessung; Schwarz gestrichelt: Tatsächlicher Verlauf der Bewehrung; Blau gestrichelt: In die Tiefe übertragene ermittelte Lage des abweichenden Stabes

In Bild 12 ist die rückseitige Bewehrung markiert. Der im Bild horizontal verlaufende Stab stimmt mit der aufgezeichneten Position überein. Die vermutete Position der im Bild senkrecht verlaufenden Bewehrung weicht 4,5 cm von der mit dem Bohrkern getroffenen Bewehrung ab. Wie in 4.2 erläutert, liegt die Abweichung damit in einem Bereich, der entsprechend der Unsicherheit der Messergebnisse plausibel ist.

Durch die Abweichung wurde bei der Bohrung unplanmäßig ein zweiter parallel dazu verlaufender Stab getroffen. Diese ungewollte Abweichung belegt, dass der Stababstand (zumindest an dieser Stelle) entgegen den Angaben des Auftraggebers 15 cm beträgt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird über einen Prüfeinsatz zur Ermittlung der rückseitigen Bewehrung einer nach Planunterlagen 60 cm dicken Betonplatte berichtet (Stabdurchmesser 20 mm). Das für Bewehrung in geringeren Tiefen etablierte Radarverfahren liefert dafür keine Ergebnisse. Mit dem bildgebenden Ultraschallechoverfahren einschließlich Phasenauswertung lässt sich dagegen im vorliegenden Falle das Muster der rückseitigen Bewehrungseisen verwertbar darstellen. In dieser großen Tiefe führt die eingeschränkte Ortsauflösung der Messung jedoch zu einer Unsicherheit von mehreren Zentimetern für die genaue Lagebestimmung der Bewehrung.

Zur weiteren Ertüchtigung des Verfahrens und um zu ermitteln, bis zu welchen Tiefen unter welchen Randbedingungen sich die Bewehrungseisen präzise abbilden lassen, sind weitere systematische Untersuchungen sinnvoll. Für eine solche Untersuchung sind der Bewehrungsgrad, der Stabdurchmesser und die Betonrezeptur (insbesondere die Gesteinskörnung) zu berücksichtigen.

6 Danksagung

Die Autoren danken den Partnern für die Ermöglichung der Messung, für die Unterstützung vor Ort und für die Überlassung des Bohrkerns für die Verifizierung. Die Auswertung der scannenden Ultraschallmessungen erfolgten mit dem Programmpaket InterSAFT, das von Dr. K. Mayer an der Universität Kassel entwickelt wurde.

Bei der Verfahrensbeschreibung (Abschnitt 2) hat Dr. F. Mielentz mitgewirkt.

Jens Wöstmann hat die Radarmessungen vor Ort durchgeführt.

7 Referenzen

- [1] Krause, M., Borchardt, K., Lange, M., Behrens, M., Maack, S., Mielentz, F. Milmann, B., Schaurich, D., Wöstmann, J., Hintzpeter, F. und Ch. Sodeikat: Kosteneinsparung durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbauteile beim Bauen im Bestand. Bauforschung für die Praxis, Band 101, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (2011), 95 Seiten.
- [2] Schickert, M. and M. Krause , Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures , In: Maierhofer, Ch., Reinhardt, H.-W. and G. Dobmann {(eds.);} Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Part II.22, pp. 490-530 , 2010.
- [3] Mielentz, F. , Einsatzpotential von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen (Dissertation) , Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) {(Hrsg.);} BAM-Dissertationsreihe, Band 24, Berlin (2007) 154 S. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften - Dr.-Ing. , 2006.
- [4] Mayer, K., Milmann, B., Krause, M. und F. Mielentz , Methode zum Nachweis von Verpressfehlern in Spannbeton durch Phasenauswertung bei Ultraschallecho-Verfahren , ZfP-Zeitung 112 (2008).
- [5] Schulze, S.; Mayer, K.; Krause, M.: Spannbetonuntersuchungen mit bildgebenden Ultraschallecho-Verfahren, Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013)
- [6] Mayer, K.: Softwarepaket *InterSAFT* zur bildgebenden Auswertung von Ultraschallechomessungen. Im Auftrag der BAM (2008).
- [7] ACSYS Acoustic control Systems Ltd., <http://www.acsys.ru>.