

Vergleich verschiedener SAFT-Verfahren bei der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion von Betonbauteilen

Martin SCHICKERT*

* Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar E-Mail Martin.Schickert@MFPA.de

Kurzfassung. Die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) wird seit langem zur Ultraschallprüfung von Betonbauteilen eingesetzt, da die damit rekonstruierten Bilder sich einfacher und genauer interpretieren lassen und rauschärmer sind als B-Bilder. Speziell dreidimensionale Rekonstruktionen erlauben die ortsrichtige Darstellung von Konstruktionselementen, Einbauteilen und Fehlstellen. Bei der Messung und damit verbunden auch bei der Rekonstruktion lassen sich verschiedene SAFT-Verfahren einsetzen, die sich hinsichtlich des Mess- und Rekonstruktionsaufwandes und des Rekonstruktionsergebnisses unterscheiden.

Im Beitrag werden drei dieser Verfahren vorgestellt und in ihrer Arbeitsweise und den messtechnischen Rekonstruktionsergebnissen beispielhaft verglichen. Dabei handelt es sich um die Datenaufnahme mit einem realen, bewegten Prüfkopf, mit einem virtuellen Prüfkopf, der innerhalb eines Prüfkopf-Arrays bewegt wird, und um die Kombination virtueller Prüfköpfe in einem Prüfkopf-Array. Die Verfahren sind unter den Bezeichnungen SAFT, *Combinational SAFT* (SAFT-C), *Sampling Phased Array* (SPA) und *Full Matrix Capture* (FMC)/*Total Focusing Method* (TFM) bekannt.

Die Arbeitsweise dieser Verfahren wird erläutert und anschaulich in einer Matrixdarstellung verglichen. Die beiden Verfahren, die sich mit der Messung mit einem Array-Prüfkopf einsetzen lassen, werden zudem anhand von Messungen an einem Testkörper mit typischen Prüfzielen eines Betonbauteils qualitativ und quantitativ verglichen. Für die Messungen wird ein automatisiertes FLEXUS-Abbildungssystem mit einem 3-Achs-Scanner und einem Ultraschall-Array mit 48 Prüfköpfen in 16 elektronisch geschalteten Gruppen verwendet. Die Untersuchungsergebnisse werden u. a. in Bezug auf die Bildqualität im Verhältnis zum Messaufwand, auf Aperturerweiterungen und auf den physikalischen Hintergrund der Verfahren diskutiert.

1. Einleitung

Die Ultraschallprüfung von Beton ermöglicht die Abbildung des inneren Aufbaus von Betonbauteilen bei einseitigem Zugang. Vor allem die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) eignet sich zur dreidimensionalen Darstellung des Betonvolumens, wodurch sich innere Objekte wie Konstruktionselemente, Einbauteile und Fehlstellen nachweisen und in ihrer Position bestimmen lassen [1]. Gleichzeitig werden die Schwierigkeiten, die sich aus der Inhomogenität des Betons für die Ultraschallprüfung ergeben, reduziert. Die Abbildungsqualität der SAFT-Rekonstruktion hängt dabei von verschiedenen Parametern des Mess- und Abbildungssystems und der Betoneigenschaften ab.



Im Beitrag werden drei SAFT-Verfahren anschaulich vorgestellt, die sich in der Datenaufnahme und dem Rekonstruktionsverfahren unterscheiden. Die Abbildungsqualität von zwei der Verfahren, die sich in Verbindung mit der Messung mit einem Prüfkopf-Array einsetzen lassen, wird anhand von beispielhaften Messungen an einem Testkörper qualitativ und quantitativ verglichen.

2. SAFT-Verfahren

2.1 Grundlagen

Die Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) ist ein Abbildungsverfahren für eine größere Anzahl zeitabhängiger Messungen (A-Bilder), die auf einem einseitigen Linien- oder Flächenraster (Apertur) aufgenommen wurden. Es kann als Nachverarbeitungsverfahren für Reflexionsmessungen (B-Bilder oder Volumenbild) verstanden werden, das die in den Messungen enthaltenen Reflexionen an inneren Objekten zu einem Bild der Objektgrenzen im Messvolumen verarbeitet.

Durch den SAFT-Algorithmus werden alle Messungen auf jeden Bildpunkt des Abbildungsbereiches fokussiert, und es wird so synthetisch ein Wandler von der Größe des Messrasters mit variablem Fokus nachgebildet [2, 3]. Durch die kohärente Überlagerung der Messungen werden die Objektgrenzen ortsrichtig abgebildet, und genügend große Objekte werfen Schatten auf die Rückwandanzeige. Da die Messung einseitig erfolgt, werden nur die der Messfläche zugewandten Objektgrenzen rekonstruiert. Bei inhomogenen Werkstoffen wie Beton durchlaufen die Wellen von unterschiedlichen Aperturpositionen aus verschiedene Schallwege zu einem gemeinsamen Ziel, so dass das Strukturrauschen an den Inhomogenitäten durch den SAFT-Algorithmus verringert wird.

Das SAFT-Abbildungsverfahren wurde zunächst heuristisch aus einem Modell der geometrischer Optik entwickelt [4], es kann aber auch rigoros aus der Theorie der inversen Streuung abgeleitet werden [5], wobei im Verlauf der Ableitung einige Näherungen eingeführt werden. Entsprechend bestehen verschiedene SAFT-Algorithmen mit unterschiedlichen Näherungen und Rechengeschwindigkeiten. Die meist verwendeten, einfachen und schnellen Algorithmen können Abbildungsfehler und Artefakte vor allem bei stark streuenden Objekten, Mehrfachreflexionen zwischen Flächen oder Objekten sowie Modenkonversionen hervorrufen.

2.2 Verschiedene SAFT-Verfahren und Begriffe

Der originale SAFT-Algorithmus wurde für die Impuls-Echo-Technik angegeben [4]. Er lässt sich direkt auf die Sende-Empfangs-Technik erweitern, wenn der Prüfkopfabstand bei der Berechnung der Laufzeiten berücksichtigt wird. Zur Datenaufnahme mehrerer Messungen auf einer linearen Apertur wird der Prüfkopf in beiden Fällen längs der Apertur bewegt.

Um die Datenaufnahme zu beschleunigen, können mehrere Prüfköpfe in einem Prüfköpf-Array angeordnet und nacheinander angesteuert werden. Die elektrische Umschaltung ersetzt dann die mechanische Verschiebung. Für den Impuls-Echo-Fall wurde dies bereits in [4] vorgeschlagen. Es können auch mehrere Wandler zu einem "virtuellen Prüfkopf" verschaltet werden, der sich durch entsprechende elektronische Ansteuerung längs des Prüfkopf-Arrays bewegt ([6] für Beton). Gegenüber dem Verfahren mit einem einzelnen Prüfkopf wird so die Geschwindigkeit der Datenaufnahme gesteigert; Algorithmus und Rekonstruktionsergebnis bleiben unverändert.

Eine Erweiterung der Messmöglichkeiten bietet sich bei Prüfkopfarrays an, indem bei konstanter Senderposition die Signale an mehreren Empfangspositionen aufgenommen werden. Wird dies für alle möglichen Senderpositionen durchgeführt, lässt sich bei gleicher Prüfkopfzahl eine Erhöhung der Anzahl der Schallwege zu einem Bildpunkt erreichen und so das Signal-Rausch-Verhältnis vor allem bei inhomogenen Medien wie Beton steigern. Das SAFT-Prinzip der kohärenten Überlagerung bleibt dabei erhalten, da die unterschiedlichen Schallwege berücksichtigt werden. Das Verfahren wurde bisher nur heuristisch eingeführt; im Unterschied zum originalen SAFT-Algorithmus ist keine rigorose Herleitung aus den Prinzipien der Wellenausbreitung und -streuung bekannt.

Dieses SAFT-Verfahren wurde im Laufe der Zeit mehrfach mit unterschiedlichen Bezeichnungen eingeführt, wobei teilweise das Messprinzip vom Rekonstruktionsalgorithmus unterschieden wurde. Die erste Veröffentlichung erfolgte unter der Bezeichnung *Combinational SAFT* (SAFT-C) in [7]. Später wurden für das Messprinzip die Namen *Sampling Phased Array* (SPA) [8] und *Full Matrix Capture* (FMC) [9] eingeführt, während für die Rekonstruktion die Begriffe SAFT weiterverwendet bzw. *Total Focusing Method* (TFM) [9] neu eingeführt wurden. In der Normung werden gegenüber diesen ursprünglich eingeführten Begriffen leicht abgewandelte Definitionen verwendet [10]. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Begriffe.

	Datenaufnahme	Bildrekonstruktion	
Bewegter realer PK	lineare Apertur	SAFT	
Bewegter virtueller PK	lineare Apertur	SAFT	
	SAFT-C		
Kombination von PKs	SPA	SAFT	
	FMC	TFM	

Tabelle 1. Begriffe für Datenaufnahme und Bildrekonstruktion

Die drei prinzipiellen Möglichkeiten werden in Bild 1 an Beispielen illustriert, wobei S für Sender und E für Empfänger steht. Im linken Bildteil wird ein realer 1S/1E-Prüfkopf auf der Apertur verschoben, im mittleren Bildteil ein virtueller 2S/2E-Prüfkopf im Prüfkopfarray elektronisch getaktet, während rechts der linke Wandler eines Prüfkopf-Arrays als Sender und die übrigen Wandler als Empfänger geschaltet sind, so dass sich eine Kombination von virtuellen 1S/1E-Prüfköpfen ergibt.



Bild 1. Aperturkonfigurationen für einen realen und einen virtuellen Prüfkopf sowie die Kombination von virtuellen Prüfköpfen

2.3 Matrixdarstellung der Messmöglichkeiten eines Prüfkopf-Arrays

Die Messmöglichkeiten eines Prüfkopf-Arrays lassen sich in einer Matrix veranschaulichen, deren Zeilen durch die *M* Sendewandler und deren Spalten durch die *N* Empfangswandler gebildet werden (ähnlich *Information Matrix* in [8]). Die Matrixelemente stellen die Kopplung zwischen den jeweiligen Sendern und Empfängern dar, z. B. könnte in einer dritten Dimension das gemessene Zeitsignal eingetragen werden. Hier wird die Matrixdarstellung aber lediglich dazu verwendet, anschaulich die Messung zwischen den entsprechenden Sende- und Empfangswandlern dazustellen. Bei gleicher Anzahl von Sende- und Empfangsfunktionen der Wandler ist die Matrix mit N = M quadratisch und bei einer Reziprozität der Übertragung symmetrisch, was im Falle des Mediums gut, im Falle der Prüfköpfe näherungsweise erfüllt sein dürfte.

Für die Fälle eines bewegten virtuellen Prüfkopfs und der Kombination virtueller Prüfköpfe aus Bild 1 ist die Matrixdarstellung für je zwei Messschritte in Bild 2 gezeigt. Durch den bewegten virtuellen 2S/2E-Prüfkopf wird eine 2x2-Submatrix rechts der Hauptdiagonalen belegt, wobei bei jeder Messung nur ein Wert bzw. Zeitsignal entsteht, das z. B. unter dem jeweils niedrigsten Index abgelegt werden kann. Bei einer vollständigen Messung wird eine Nebendiagonale belegt, abhängig von der Größe des virtuellen Prüfkopfs allerdings nicht vollständig. Im Fall der Kombination von virtuellen Prüfköpfen wird bei jeder Messung die Zeile rechts der Hauptdiagonalen belegt, bei einer vollständigen Messung entsteht so eine strikte obere Dreiecksmatrix.



Bild 2. Matrixdarstellung der ersten beiden Positionen eines bewegten virtuellen Prüfkopfs (links) und einer Kombination von virtuellen Prüfköpfen (rechts)

2.4 Erweiterung der Apertur

Bei praktischen Messaufgaben ist es häufig notwendig, die lineare Apertur zu erweitern, indem sie entweder linear verlängert oder senkrecht zur Aperturrichtung auf eine planare Apertur vergrößert wird.

Zur Verlängerung der linearen Apertur braucht bei einem bewegten realen Prüfkopf lediglich die Scan-Linie verlängert zu werden. Bei einem bewegten virtuellen Prüfkopf wird das Prüfkopf-Array versetzt. Besteht der virtuelle Prüfkopf aus mehr als je einem Sende- und Empfangswandler, müssen sich die Scan-Bereiche um den Abstand vom ersten bzw. letzten Arrayprüfkopf bis zum Mittelpunkt des virtuellen Prüfkopfs überlappen, um eine lückenlose Abtastung zu erreichen (Abschnitt 2.3). Je größer der virtuelle Prüfkopf ist, umso größer die Überlappung, und umso kleiner die effektive Verlängerung der Aperturlänge. Bei dem virtuellen 2S/2E-Prüfkopf in Bild 1, Mitte, ist eine Überlappung von 3 Prüfkopfpositionen notwendig, um eine lückenlose Abtastung zu erhalten. In der Matrixdarstellung entspricht dies dem Hinzufügen einer zweiten Matrix rechts unterhalb der ersten. Bei einer Überlappung schieben sich die Matrizen ineinander.

Im Fall der Kombination von virtuellen Prüfköpfen lässt sich eine vollständige Verlängerung überhaupt nicht realisieren, da hierzu u. a. eine Kombination von Senderpositionen in der ersten Matrix zu Empfangspositionen in der zweiten Matrix erforderlich wäre. Wird der maximal ausgenutzte Abstand zwischen Sender und Empfänger auf *P* Wandlerposition beschränkt, kann das Schema bei Verlängerung der Aperturlänge vollständig beibehalten werden, allerdings um den Preis einer großen Überlappung. In der Matrixdarstellung werden von der oberen Dreiecksmatrix dann nur die ersten *P* Nebendiagonalen besetzt.

Soll die lineare Apertur zu einer planaren vergrößert werden, werden bei einem bewegten realen Prüfkopf einfach weitere Scan-Linien parallel zur ersten gelegt. Bei virtuellen Prüfköpfen ist ein zweidimensionales Prüfkopf-Array notwendig. Um den Geräteaufwand zu begrenzen, kann bei bewegten virtuellen Prüfköpfen die Ausdehnung der zweiten Array-Dimension beschränkt werden; minimal auf die Größe des virtuellen Prüfkopfs. Für den Fall der Kombination virtueller Prüfköpfe steigt die Anzahl der Messungen mit der vierten Potenz der Anzahl der berücksichtigten Wandler, so dass der Messaufwand bei planaren Prüfkopf-Arrays schnell unrealistisch groß wird.

3. Automatisiertes Abbildungssystem

Für den messtechnischen Vergleich der SAFT-Verfahren wurde das FLEXUS-Abbildungssystem der MFPA Weimar genutzt, das speziell für die Betonuntersuchung entwickelt wurde [11]. Das System besteht aus einem Niederfrequenz-Ultraschallgerät des Ing.-Büro Dr. Hillger, einem schrittmotorgesteuerten 3-Achs-Scanner sowie Mess-, Scan- und Abbildungssoftware (Bild 3). Mit dem System können zwei- und dreidimensionale SAFT-Rekonstruktionen von Betonbauteilen direkt vor Ort und weitgehend automatisiert generiert werden.



Bild 3. Ultraschall-Abbildungssystem zur dreidimensionalen SAFT-Rekonstruktion von Betonbauteilen

Für die Messungen wurde das lineare Prüfkopf-Array UA1 der MFPA Weimar verwendet. Das Prüfkopf-Array besteht aus 48 Wandlern, von denen je 3 elektrisch parallel geschaltet sind, so dass sich 16 Gruppen in einem 20 mm-Raster ergeben (Bild 4). Jede dieser Gruppen kann über den FLEXUS-Multiplexer des Ing.-Büro Dr. Hillger dynamisch als Sender, Empfänger oder inaktiv geschaltet werden, wobei beliebige Kombinationen und Abfolgen von Ansteuerungen festgelegt werden können. Als Wandler werden 55 kHz-Punktkontakt-Prüfköpfe für Transversalwellen der Fa. ACSYS eingesetzt, die über Keramikspitzen ohne Koppelmittel angekoppelt werden. Innerhalb der 16 Wandlergruppen lassen sich damit beliebige virtuelle Prüfköpfe realisieren.



Bild 4. Ultraschall-Prüfkopf-Array mit 48 Wandlern in 16 Gruppen (55 kHz-Transversalwellen-Prüfköpfe)

Das Prüfkopf-Array wird durch den mechanischen Scanner auf einer Fläche von 1,00 m x 0,80 m bewegt. Die Fläche wird dabei in Spuren von der Breite des gewählten virtuellen Prüfkopf-Arrays mäanderförmig abgefahren, wobei eine eventuell notwendige Überlappung eingestellt werden kann. Die Abbildungssoftware berechnet während des Scanvorgangs zweidimensionale SAFT-Rekonstruktionen der einzelnen elektronischen Scans und fügt sie zu einem dreidimensionalen Bild zusammen, das aus den Schnittbildern zusammengesetzt ist (*Sliced 3D SAFT*). Dieses Volumenbild steht nach Abschluss der Messungen sofort zur Betrachtung und Auswertung zur Verfügung.

4. Vergleichsmessungen

4.1 Anordnung und Durchführung

Die Vergleichsmessungen zur Abbildung von punkt- und linienförmigen Objekten wurden am Testkörper TK0901 durchgeführt. Der Testkörper ist 1,2 m x 0,8 m x 0,3 m groß und besteht aus Beton C30/37 mit Größtkorn 16 mm. Er enthält drei Leerrohre mit teils wechselndem Durchmesser, drei akustische Hohlräume (Styrodurlinsen) von 80 mm Durchmesser und einen Abschnitt mit Mattenbewehrung von 12 mm Durchmesser und 150 mm Maschenweite (Bild 5).

Für die Messungen wurde eine Apertur von $0,90 \text{ m} \ge 0,72 \text{ m}$ in fünf Spuren abgetastet, wobei die Überlappung je nach SAFT-Verfahren variierte; das Messraster betrug 20 mm ≥ 20 mm. Jede Einzelmessung wurde mit derselben Sendeenergie und 40 Mittelungen beim Empfang aufgenommen.



Bild 5. Testkörper mit punkt- und linienförmigen Objekten: Zeichnung in Seitenansicht (oben) und Aufsicht (unten)

Der Verfahrensvergleich wurde zwischen den SAFT-Verfahren mit bewegtem virtuellen Prüfkopf und der Kombination von virtuellen Prüfköpfen in den folgenden Varianten durchgeführt (Messzeiten in Klammern):

- 2D-SAFT, virtueller 9S/9E-Prüfkopf, 11 Takte je PK-Array-Position (25 min)
- 2D-SAFT, virtueller 6S/6E-Prüfkopf, 13 Takte je PK-Array-Position (21 min)
- 2D-SAFT, virtueller 3S/3E-Prüfkopf, 15 Takte je PK-Array-Position (17 min)
- 2D-SAFT-C, virtueller 3S/3E-Prüfkopf, Kombination 120 Takte je PK-Array-Position, maximaler Wandlerabstand $\Delta_{max} = 15$ (77 min)
- 2D-SAFT-C, virtueller 3S/3E-Prüfkopf, Kombination 92 Takte je PK-Array-Position, maximaler Wandlerabstand $\Delta_{max} = 8$ (61 min)

Im letzten Fall wurde der maximal ausgenutzte Abstand zwischen Sender und Empfänger auf 8 Wandlerpositionen beschränkt, um das SAFT-C-Schema in jeder Aperturlinie auch über die Arraygrenzen hinaus vollständig beibehalten zu können. Im vorletzten Fall wurden die SAFT-C-Messungen zunächst ohne Überlappung aufgenommen und die Rekonstruktionsergebnisse dann nebeneinander zusammengefügt, wobei sie überlappt wurden, um den gleichen Spurabstand wie bei den anderen Messungen zu erreichen.

4.2 Rekonstruktionsergebnisse

Wie oben beschrieben, wurde von der Abbildungssoftware während der Messung aus den zweidimensionalen SAFT- bzw. SAFT-C-Schnittbildern jeder Messung ein dreidimensionales Bild zusammengesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde ein Tiefenausgleich eingesetzt, der auf die Bilder für möglichst gleiche Ergebnisse, jedoch nicht quantitativ angewendet wurde.

Zur Auswertung wurden die Rekonstruktionsergebnisse als räumliche Iso-Oberflächenbilder dargestellt und qualitativ verglichen. Für die Arraymessung #162 in der 5. Messspur wurde außerdem beispielhaft eine quantitative Auswertung anhand der Querschnittbilder durchgeführt. Wegen der großen Anzahl der Ergebnisbilder werden nachfolgend nur ausgewählte Ergebnisse diskutiert.

In den 3D-Darstellungen in den Bildern 6 und 7 sind die Rückwand, alle drei Rohre und zwei der drei Hohlräume im Überblick zu sehen. Ein Vergleich mit den Zeichnungen in Bild 5 zeigt, dass die Objekte an den korrekten Positionen dargestellt werden. Die oberste Styrodurlinse und die Bewehrung liegen teilweise noch in den Pulseinflusszonen und sind in diesen Bildern daher nicht dargestellt.

Die 3D-Iso-Oberflächen-Darstellung für den virtuellen S9/E9-Prüfkopf in Bild 6 gibt alle Objekte gut wieder. Geringes Rauschen macht sich in vereinzelten Rauschblasen und etwas ausgefransten Objektanzeigen bemerkbar (Bild 6, oben). Die Ergebnisse für den virtuellen S6/E6-Prüfkopf sind geringfügig stärker verrauscht und die Anzeigen ungleichmäßiger, die für den virtuellen S3/E3-Prüfkopf sind stark verrauscht, und die Objekte sind gerade noch erkennbar (beide Ergebnisse nicht dargestellt). Demgegenüber ist das Rauschen bei der Kombination von virtuellen S3/E3-Prüfköpfen mit einem maximalen Gruppenabstand von 8 Wandlern ähnlich, jedoch sind die Objektanzeigen deutlich glatter (Bild 6, unten); bei maximalem Gruppenabstand von 15 Wandlern wird die Darstellung noch klarer (Ergebnis nicht dargestellt).



Bild 6. Iso-Oberflächen-Darstellung der 3D-SAFT-/SAFT-C-Schnittbild-Rekonstruktionen des Testkörpers, Schrägansicht: Bewegter virtueller S9/E9-Prüfkopf (oben) und Kombination von virtuellen S3/E3-Prüfköpfen mit einem maximalen Gruppenabstand von 8 Wandlern (unten)

Zwei der Ergebnisse sind als 3D-Iso-Oberflächen-Darstellungen in Bild 7 noch einmal in der Aufsicht gezeigt. Dabei wird die glattere Darstellung durch das SAFT-C-Verfahren (hier mit einem maximalen Gruppenabstand von 15 Wandlern) noch deutlicher (Bild 7, unten). Bei den beiden linken Querrohren ist sogar der geringere Durchmesser ab Bildmitte erkennbar. Beide linke Rohre liegen genau auf der Grenze zwischen zwei Spuren: Während beim linken Querrohr rechts daneben ein Artefakt auftritt, wird die Spurgrenze beim rechten Rohr nur durch eine leichte Trennlinie sichtbar. Die Auflösung ist hier also auch an der Grenze zwischen zwei Prüfkopfaperturen gut, obwohl in diesem Fall das SAFT-C-Abtastschema durchbrochen ist. In der Rückwand sind die Spurgrenzen teilweise sichtbar. Im Vergleich zum verschobenen virtuellen Prüfkopf (Bild 7, oben) ist die Abbildung von Objekten und Rückwand gleichmäßiger, aber die dritte Linse ist auch nicht durch eine Rückwandabschattung lokalisierbar.



Bild 7. Iso-Oberflächen-Darstellung der 3D-SAFT-/SAFT-C-Schnittbild-Rekonstruktionen des Testkörpers, Ansicht von oben: Bewegter virtueller S9/E9-Prüfkopf (oben) und Kombination von virtuellen S3/E3-Prüfköpfen mit einem maximalen Gruppenabstand von 15 Wandlern (unten)

Die quantitativen Unterschiede der Abbildung der verschiedenen SAFT-Verfahren werden anhand der Arraymessung #162 in der 5. Messspur exemplarisch ausgewertet. Eine solche quantitative Auswertung ist im Darstellungs- und Auswerteprogramm REKONS interaktiv und halbautomatisch durchführbar. Dabei werden die Objektgrenzen sowie die Kennwerte der Anzeigen inklusive des Signal-Rausch-Abstands zu einem wählbaren Rauschbereich bestimmt.

In Bild 8 sind das SAFT- bzw. SAFT-C-Bild der Verfahren dargestellt, die auch in Bild 7 zur Anwendung kamen. Das SAFT-C-Bild ist wegen der noch nicht angewandten Überlappung breiter. In ihm ist die Anzeige des Querrohres gleichmäßiger, das Signal-Rausch-Verhältnis ist besser. Allerdings fällt die fehlende Rückwandabschattung durch das Querrohr auf, was wahrscheinlich durch die Rückwandreflexion weit auseinander liegender Wandlergruppen hervorgerufen wird.



Bild 8. 2D-SAFT-/SAFT-C-Rekonstruktionen der Arraymessung #162: Bewegter virtueller S9/E9-Prüfkopf (oben) und Kombination von virtuellen S3/E3-Prüfköpfen mit einem maximalen Gruppenabstand von 15 Wandlern (unten)

Tabelle 2 fasst die Signal-Rauschverhältnisse von Querrohr und Rückwand in der Rekonstruktion #162 für alle untersuchten SAFT-Verfahren zusammen. Die Werte bestätigen die qualitative Auswertung, jedoch sind die numerischen Unterschiede geringer als subjektiv anhand der Rekonstruktionsergebnisse erwartet.

und Rückwand für die SAFT-/SAFT-C-Rekonstruktion #162			
Querroh	ır	Rückwand	

Tabelle 2. Vergleichstabelle der Signal-Rausch-Abstände von Querrohr

	Quenoni	Ruckwanu
SAFT 9 S/9 E, 11 Takte	18,8 dB	15,2 dB
SAFT 6 S/6 E, 13 Takte	18,9 dB	14,6 dB
SAFT 3 S/3 E, 15 Takte	13,6 dB	11,2 dB
SAFT-C 3 S/3 E, Δ _{max} =15, 120 Takte	20,9 dB	15,8 dB
SAFT-C 3 S/3 E, Δ _{max} =8, 92 Takte	20,6 dB	14,1 dB

5. Zusammenfassung

Die Rekonstruktionsergebnisse der hier dokumentierten Messungen zeigen eine qualitativ und quantitativ bessere Abbildungsqualität des SAFT-C-Verfahrens, bei dem alle möglichen Sende-Empfangs-Kombinationen des Prüfkopf-Arrays ausgenutzt wurden, gegenüber dem herkömmlichen SAFT-Verfahren eines bewegten virtuellen Prüfkopfs. Vor allem für inhomogene Werkstoffe wie Beton hat das SAFT-C-Verfahren Vorteile, da unterschiedliche Schallwege durch das Material zu einem gemeinsamen Zielpunkt das Strukturrauschen vermindern. Erkauft werden die Vorteile durch eine etwas dreifache Messzeit. Je nachdem, wie viele Wandlerabstände im Array berücksichtigt werden, kann die Messzeit dabei unpraktikabel lang werden. Die Rekonstruktionszeit verlängert sich ebenfalls, was gegenüber der Messzeit aber nicht ins Gewicht fällt.

Eine Verlängerung der Apertur ist beim SAFT-C-Verfahren bei Beibehaltung des Abtastschemas nur möglich, wenn der verwendete maximale Wandlerabstand begrenzt wird. Die Ergebnisse haben aber auch gezeigt, dass ein Aneinanderreihen der Rekonstruktionen mit Überlappung bei Berücksichtigung aller Wandlerkombinationen auch an den Spurgrenzen nur zu handhabbaren Problemen führt. Steht die Messzeit im Vordergrund, kann auch das herkömmliche SAFT-Verfahren mit Verschiebung virtueller Prüfköpfe für viele Aufgabenstellungen verwendet werden, da die Rekonstruktionsergebnisse nicht wesentlich schlechter sind.

Die Verwendung des SAFT-C-Verfahrens auf planaren Aperturen erscheint gegenwärtig wegen des Geräte- und Messaufwandes unpraktikabel. Da ein bewegter realer Prüfkopf auf planaren Aperturen zu langsam ist, stellt der hier verfolgte Ansatz von 3D-SAFT-Bildern aus 2D-SAFT-Schnittbildern, die bei der Messung durch eine Kombination aus schnellem elektronischem Umschalten und langsamen mechanischen Versatz aufgenommen werden, derzeit einen guten Kompromiss dar.

Zu beachten ist, dass SAFT-C bei großen Abständen zwischen Sende- und Empfangswandler nicht mehr rein in Reflexion arbeitet. Das einseitige SAFT-Prinzip als reine Reflexionstomografie wird hier durchbrochen. Eine theoretische Begründung für das SAFT-C-Verfahren steht noch aus.

Danksagung

Der Autor dankt Herrn U. Tümmler (MFPA Weimar) für die Unterstützung bei den Messungen.

Referenzen

- Schickert, M.; Krause, M.: Ultrasonic Techniques for Evaluation of Reinforced Concrete Structures. In: C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, G. Dobmann (Eds.): *Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. Vol. 2: Non-destructive Testing Methods*. Cambridge: Woodhead, 2010, 490– 530
- [2] Schickert, M.; Krause, M.; Müller, W.: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. *Journal of Materials in Civil Engineering* 15,3 (2003) 235–246
- [3] Langenberg, K.-J.; Mayer, K.; Marklein, R.: Zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Modellierung und Abbildung. In: H.-W. Reinhardt *et al.*: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen. In: Bergmeister, K.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Betonkalender 2007*. Bd. 1. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, 518–536
- [4] Flaherty, J. J.; Erikson, K. R.; Lund, V. M.: Synthetic Aperture Ultrasonic Imaging Systems, U.S. Patent No. 3,548,642, 1970
- [5] Langenberg, K.-J.: Applied Inverse Problems. In: P. C. Sabatier (ed.): *Basic Methods of Tomography and Inverse Problems*. Bristol, England: Adam Hilger, 1987
- [6] Schickert, M.; Hillger, W.: Automated Ultrasonic Scanning and Imaging System for Application at Civil Structures. In: 10th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Moskau, 7.– 11.6.2010. Moskau: Russian Society for Non-Destructive Testing (RSNTTD), CD-ROM 1, 2010, 1.14.5, 1–10
- Kovalev, A.V.; Kozlov, V.N.; Samokrutov, A.A.; Shevaldykin, V.G.; Yakovlev, N.N.: Puls-Echo Technique for Concrete Inspection. Interferences and Spatial Selection. *Defectoskopiya* 2 (1990) 29– 41 (in russisch)
- [8] Bernus; L.v.; Bulavinov, A.; Joneit; D.; Kröning, M.; Dalichov, M.; Reddy, K.M.: Sampling Phased Array – A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging. In: *Proc. ECNDT 2006*. ECNDT, 2006, 1–13
- [9] Holmes, C.; Drinkwater, B.W.; Wilcox, P.D.: Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation. Ultrasonics 48,6-7 (2008) 636–642
- [10] DIN EN 16018: Zerstörungsfreie Prüfung Terminologie Begriffe der Ultraschallprüfung mit phasengesteuerten Arrays; Ausgabe 2012-02
- [11] Schickert, M.; Hillger, W.: Erste Messergebnisse mit dem scannenden Ultraschall-Multikanal-Messund Abbildungssystem FLEXUS f
 ür Betonbauteile. In: DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt, 10.– 12.5.2010. Berlin: Deutsche Gesellschaft f
 ür Zerstörungsfreie Pr
 üfung (DGZfP), 2010, 1–9