

Entwicklung einer Prüftechnik zur Detektion und Tiefenbestimmung von Rissen an Beton

Sascha FEISTKORN, Daniel ALGERNON, Michael SCHERRER
SVTI - Schweizerischer Verein für technische Inspektionen,
Nuklearinspektorat, Wallisellen, Schweiz

Kurzfassung. In der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung metallischer Werkstoffe gehört der Einsatz von Winkelprüfköpfen zur Detektion von Rissen seit Jahrzehnten zum Stand der Technik. Durch die Schrägeinschallung können mit der inneren oder äusseren Oberfläche verbundene Risse aufgrund des Winkelspiegeleffekts zuverlässig detektiert sowie durch das Rissspitzenecho in ihrer Tiefe bestimmt werden. Neben der Ortung von Verdachtsstellen ist unter Anwendung entsprechender Prüfvorschriften somit die Charakterisierung dieser Anzeigen hinsichtlich ihrer Längen- und Tiefenausdehnung aufgrund verschiedener Kriterien gängige Praxis.

Bei der Ultraschallprüfung an Beton werden heutzutage Senkrechtprüfköpfe im Frequenzbereich zwischen 50 kHz und 120 kHz sowohl mit Longitudinal- als auch mit Transversalwellen verwendet, um beispielsweise Hohlstellen wie Kiesnester und metallische Einbauteile zu detektieren oder geometrische Abmessungen sowie Materialeigenschaften wie beispielsweise die Druckfestigkeit zu bestimmen. Ansätze zur Detektion und Beschreibung von Rissen mit dem Ultraschallechoverfahren basieren derzeit vor allem auf der versetzten Anordnung dieser Senkrechtprüfköpfe kombiniert mit einer flächigen Messdatenaufnahme und anschliessender bildgebender Auswertung.

Niederfrequente Winkelprüfköpfe werden derzeit noch nicht an Beton genutzt. Die Ausnutzung des Winkelspiegeleffekts zur Detektion von Rissen an unzugänglichen Betonoberflächen sowie die Optimierung des Beugungsechos zur Risstiefenbestimmung durch Schrägeinschallung bieten jedoch grosses Potential.

In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse der Anpassung dieser Prüftechnik auf den Werkstoff Beton durch Kombination mit weiteren Prüftechniken erläutert sowie Ergebnisse erster Untersuchungen an einem Testkörper mit einem für diesen Werkstoff entwickelten Prüfkopf präsentiert.

1 Einführung

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen sind Risse im Werkstoff Beton nicht grundsätzlich schädlich und somit nicht zwangsläufig zu vermeiden. Vielmehr sind im Verbundwerkstoff Stahlbeton Risse teilweise notwendig, um das Tragverhalten zu aktivieren. Jedoch müssen sie auf ein unschädliches Mass begrenzt werden, um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dauerhaft sicherzustellen. Überschreiten die Risstiefen einen kritischen Wert, der von den vorliegenden Randbedingungen abhängt, ist die Dauerhaftigkeit des Bauwerks durch das Eindringen von Wasser und der damit verbundenen Bewehrungskorrosion und eventueller Fortschäden nicht mehr gegeben. So dringen beispielsweise bei einer Risstiefe, die grösser als die Betondeckung

oberflächennaher Bewehrung ist, Chloride leichter zur Bewehrung vor, sodass die chloridinduzierte Korrosion beschleunigt wird. Darum ist es erforderlich, Risstiefen zuverlässig bestimmen zu können; zum Einen, um den Nachweis zu führen, dass eine kritische Risstiefe noch nicht überschritten wurde und zum Anderen, um den Rissfortschritt bzw. das Risswachstum zu überwachen.

Im Rahmen dieses Artikels wird ein Prüfsystem vorgestellt, welches in naher Zukunft für die Rissdetektion und Rissbeschreibung an Betonbauteilen in der Praxis eingesetzt werden soll und in diesem Artikel als „Winkelprüfkopf“ bezeichnet wird. Auf die genaue Beschreibung der Prüftechnik wird in diesem Beitrag verzichtet, da zurzeit geprüft wird, inwieweit diese Entwicklung patentrechtlich geschützt werden kann.

2 Stand der Detektion und Tiefenbestimmung von Rissen an Beton

Normativ wurden Empfehlungen für die Messungen einer Risstiefe im British Standard BS 1881 Part 203, Ausgabe 1986, [1] gegeben, welcher jedoch im Jahr 2004 durch die Norm EN 12504-4 [2] ersetzt wurde. Risstiefen wurden hier nach folgendem Vorgehen abgeschätzt:

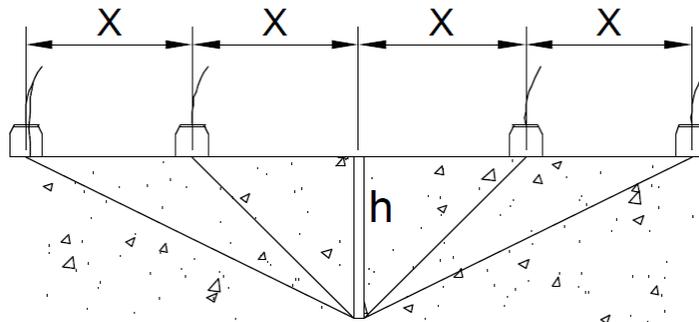


Abb. 1: Vorgehensweise nach BS 1881: Part 203 (1986); ersetzt durch EN 12504-4:2004; entnommen aus [3]

Werden zwei Prüfköpfe in Form eines Senders und eines Empfängers wie in Abb. 1 links und rechts neben einem Riss im Abstand von X sowie von $2X$ positioniert, kann die Risstiefe nach folgender Formel abgeschätzt werden, wobei die Laufzeiten an den Positionen X und $2X$ als T_1 und T_2 bezeichnet werden:

$$h = X \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad \text{Gleichung (1)}$$

Bei dieser Vorgehensweise ist die Detektion eines Risses jedoch im ersten Schritt visuell erforderlich, anschliessend erfolgt die Abschätzung der Risstiefe durch Laufzeitmessung der an der Risspitze gebeugten Welle.

Neben einer erforderlichen Zugänglichkeit zum Riss bzw. der entsprechenden Oberfläche des Bauteils erhöhen eine Verkippung des Risses, eine kurze Risslänge sowie Schallbrücken in Form von Bewehrung oder Gesteinskörnungen bzw. Verunreinigungen die Messunsicherheit bei der Abschätzung der Risstiefe, sodass dieses Verfahren nur begrenzt zuverlässig ist [6].

Die zweidimensionale Abtastung mit Punktkontaktprüfköpfen sowie mit modernen Array-Prüftechniken und der damit verbundenen Anschallung eines Risses von verschiedenen Seiten in Kombination mit bildgebenden Auswerteverfahren [4], [5] erweist sich als grösstenteils zuverlässig (Tiefen werden geringfügig überschätzt) und erhöht die Aussagesicherheit. Jedoch erfordert auch diese Methode eine freie Zugänglichkeit zum

Riss, so dass eine Risstiefenbeschreibung von Fehlern, die mit unzugänglichen Oberflächen verbunden sind, nicht möglich ist.

3 Detektion und Tiefenbestimmung von Rissen an metallischen Werkstoffen

Für die Detektion und die Risstiefenbestimmung an metallischen Werkstoffen hat sich unter anderem die Winkelprüftechnik seit Jahren etabliert und als zuverlässig erwiesen. Hierbei wird ein piezoelektrischer Schwinger unter einem Winkel auf einem Vorlaufkeil aus Plexiglas angeordnet, wodurch eine Schrägeinschallung erzielt wird. Die Schrägstellung des Schwingers ist hierbei vom Verhältnis der Geschwindigkeiten Plexiglas/Stahl sowie dem gewünschten Einschallwinkel abhängig.



Abb. 2: Aufbau eines 2 MHz Winkelprüfkopfs am Beispiel des WB 70 – N2

Neben einer Bedämpfung des Blei-Zirkonat-Titanat Schwingers durch ein optimiertes Backing-Material zeichnen sich die Prüfköpfe durch eine natürliche Fokussierung aufgrund des günstigen Verhältnisses von Durchmesser (~ 20 mm) zu Wellenlänge (~ 2 mm) im Vergleich zu herkömmlichen Prüfköpfen für die Untersuchung von Betonbauteilen aus. Dies wird am Schallfeld eines 45° Winkelprüfkopfs deutlich, welches in Abb. 3 dargestellt ist.

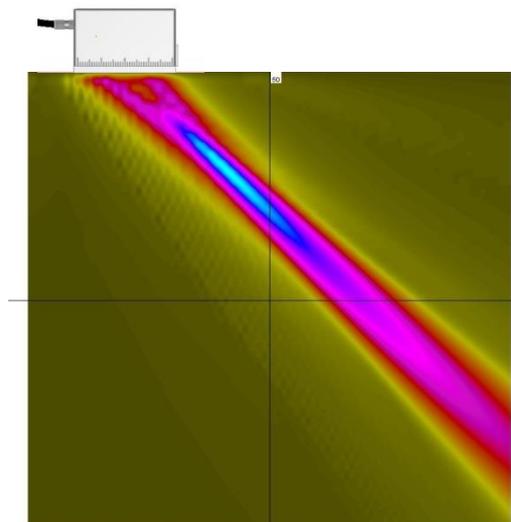


Abb. 3: CIVA Schallfeldsimulation eines 45° Winkelprüfkopfs (Frequenz 2 MHz; Transversal)

Wird nun der Winkelspiegeleffekt für die Detektion eines Fehlers sowie zur Bestimmung der Laufzeit zum Fusspunkt dieser Anzeige ausgenutzt, kann in Verbindung mit dem Beugungsecho der Rissspitze die Tiefe einer Anzeige wie in Abb. 4 aus der sich ergebenden Laufzeitdifferenz beider Reflexionen abgeschätzt werden.

Im aufgeführten Beispiel einer 20 mm tiefen Nut ergibt sich unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle von 3.230 m/s sowie einer Laufzeitdifferenz von 17.8 μs eine rechnerische Nuttiefe von 20.3 mm.

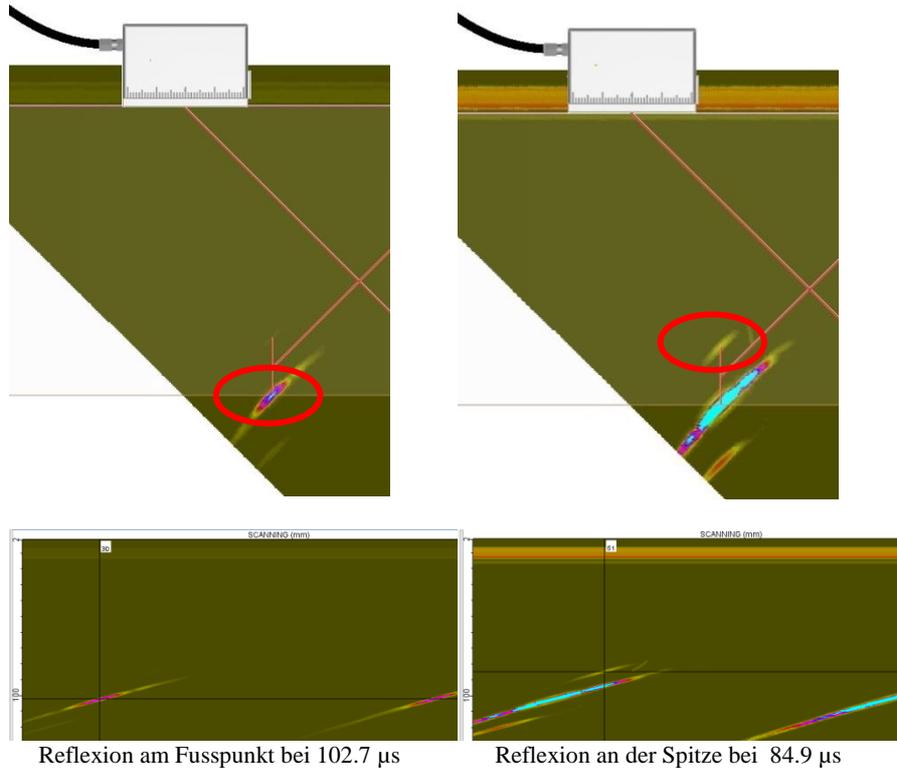


Abb. 4: CIVA Simulation elastischer Wellen an einer 20 mm tiefen Nut

Da mit dieser Prüftechnik zum Einen sowohl die Detektion als auch die Tiefenbestimmung eines Fehlers vorgenommen werden kann und zum Anderen keine Zugänglichkeit zur Oberfläche, an der sich der Fusspunkt der Anzeige befindet, gegeben sein muss, bietet diese Prüftechnik im Vergleich zu herkömmlichen an Beton angewendeten Prüftechniken in Form von Senkrechtprüfköpfen Vorteile, die eine Übertragung auf den Werkstoff Beton rechtfertigt.

4 Analyse der Übertragbarkeit der Winkelprüftechnik auf den Werkstoff Beton

Für eine Anpassung der Winkelprüftechnik auf den Werkstoff Beton durch Kombination mit weiteren Prüftechniken erfolgte im ersten Schritt ein Vergleich der Schallfelder herkömmlicher Prüfköpfe, die unter anderem bei der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung von metallischen und mineralischen Werkstoffen verwendet werden.

Dem schon in Kapitel 3 vorgestellten Winkelprüfkopf wurde ein herkömmlicher Longitudinalwellenprüfkopf mit einer Mittenfrequenz von 80 kHz und Senkrechteinschallung gegenübergestellt, um die Randbedingungen im ersten Schritt möglichst einfach zu halten. Eine Untersuchung von den in der Praxis bewährten Transversalwellenprüfköpfen ist zu einem späteren Zeitpunkt angestrebt, wenn sich eine Schrägeinschallung von Longitudinalwellenprüfköpfen als erfolgreich herausgestellt hat. Dies liegt darin begründet, dass Modenumwandlungen an den Oberflächen die Konzeption

von Winkelprüfköpfen basierend auf den herkömmlich verwendeten Transversalwellenprüfköpfen erheblich erschweren.

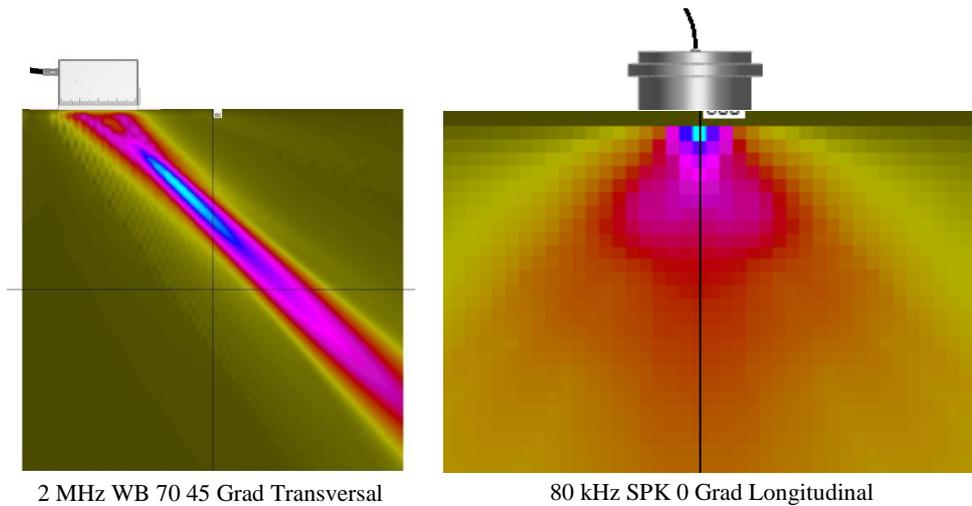


Abb. 5: CIVA Simulation zum Schallfeldvergleich herkömmlicher Prüfköpfe für Stahl und Beton

Wie in Abb. 5 ersichtlich ist, unterscheiden sich die Schallfelder hinsichtlich ihrer Fokussierung erheblich. Da der Schwingerdurchmesser herkömmlicher Prüfköpfe für die Prüfung metallischer Werkstoffe ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt, ist eine natürliche Fokussierung des Schallbündels gegeben. Anders verhält es sich bei den herkömmlichen Senkrechtprüfköpfen, die zur Ultraschallprüfung von Beton im praktischen Einsatz sind. Einer Wellenlänge im Bereich von ca. 5 cm bei einer Mittenfrequenz von 80 kHz und einer angenommenen Ausbreitungsgeschwindigkeit von 4.000 m/s steht in diesem Fall ein Schwingerdurchmesser von ebenfalls ca. 5 cm gegenüber.

Dies führt dazu, dass die Detektion wie in Abb. 6 dargestellt schwierig und nur bei einem engen Messraster möglich ist. Eine Tiefenbestimmung kann mit dieser Prüftechnik nicht durchgeführt werden.

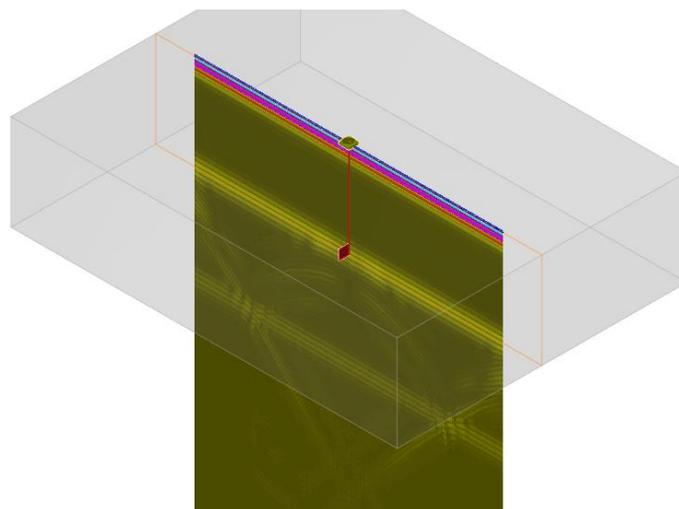


Abb. 6: B-Bild der CIVA Simulation eines Betonbauteils; Dicke 50 cm; Nuttiefe 5 cm

Wird dieser Prüfkopf ohne Fokussierung nun um einen Winkel geschwenkt, wird kein positiver Effekt erzeugt, da die weiterhin unveränderte kugelförmige Wellenausbreitung dazu führt, dass der gleiche Prüfbereich im Bauteil „ausgeleuchtet“ wird.

5 Entwicklung einer Prüftechnik mit der Simulationssoftware CIVA

Aus diesem Grund wurde die semianalytische Simulationssoftware CIVA dazu verwendet, verschiedene Prüftechniken am Werkstoff Beton zu modellieren, um deren Erfolgsaussichten hinsichtlich einer Fokussierung vorab einschätzen zu können. Durch dieses Vorgehen der Prüftechnikentwicklung für den Werkstoff Beton konnten verschiedene Ideen der Umsetzung von vornherein ausgeschlossen sowie erfolgversprechende Ansätze näher untersucht werden. Abb. 7 zeigt das Schallfeld einer entworfenen Prüftechnik in Senkrechteinschallung sowie in Schrägeinschallung. Weiterhin ist die „Rissantwort“ der auf Longitudinalwellen basierenden Prüftechnik an der 5 cm tiefen Nut in Abb. 7 unten dargestellt. Neben den Reflexionen direkt an der Nut, die aufgrund der Wellenlänge in diesem Fall eine Auflösung der Nuttiefe nicht zulassen, sind weitere Reflexionen durch indirekte Anschallung der Nut sowie durch Wellenumwandlungen sichtbar.

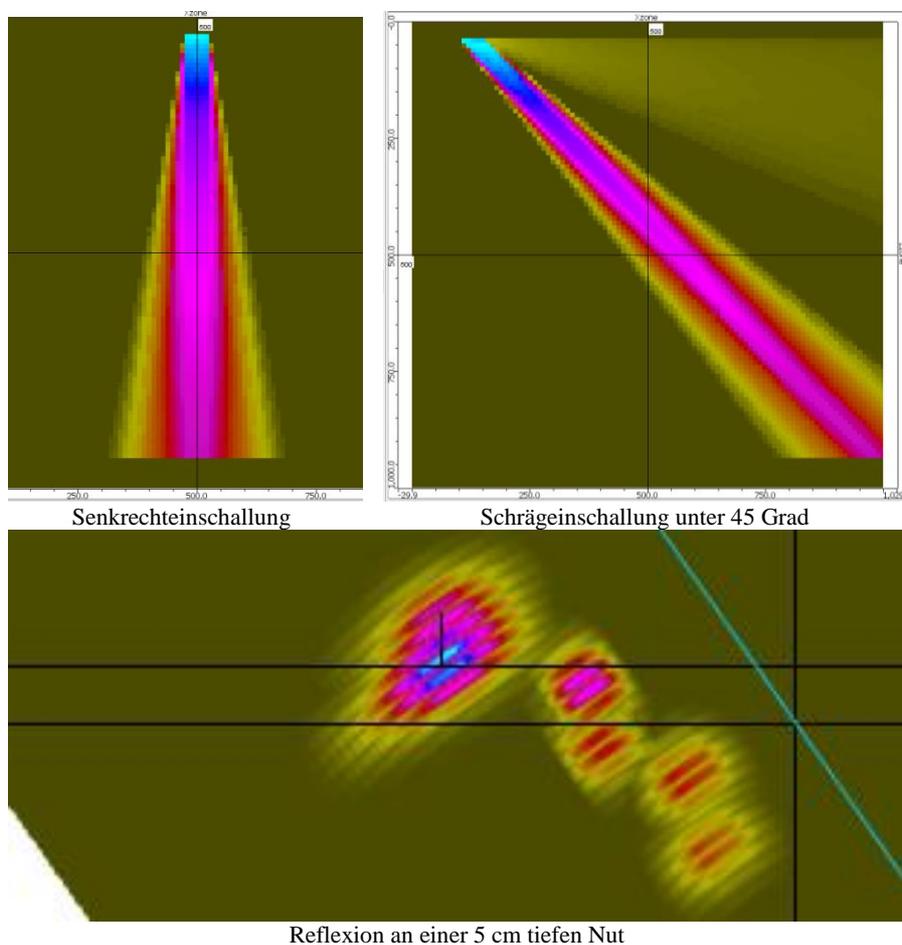


Abb. 7: Simulation der Schallfelder einer mit CIVA entwickelten Prüftechnik; Dicke 50 cm; Nuttiefe 5 cm

Diese Prüftechnik, die sich in den Simulationen als erfolgversprechend hinsichtlich der Detektion herausstellte sowie eine Auflösung der Nuttiefe bei Auswertung aller Signalantworten ermöglichte, wurde anschliessend im ZfP-Labor des Nuklearinspektorats nachgebaut.

Anschliessend ist im ersten Schritt die Fokussierung dieser Prüftechnik auf sehr einfache Art und Weise überprüft worden. Dazu wurde ein Testkörper aus Beton mit einer Dicke von 30 cm verwendet, an dem ein herkömmlicher Longitudinalwellenprüfkopf auf der Rückseite als Empfänger angebracht wurde. Als Sender diente auf der Oberseite zum Einen ebenfalls ein Longitudinalwellenprüfkopf, zum Anderen wurde die neu entwickelte

Prüftechnik installiert. Nun erfolgte wie in Abb. 8 dargestellt eine schrittweise Verschiebung des Empfängers um 5 cm nach Aufzeichnung der Signalamplitude. Diese aufgezeichneten Signalamplituden wurden mit einer Referenzamplitude verglichen, um die Schwächung des Schallfelds zu erfassen. Als Referenzamplitude diente hierbei die Amplitude, die bei der Positionierung des Empfängers direkt unterhalb des Senders (Pos. 1) aufgezeichnet wurde.

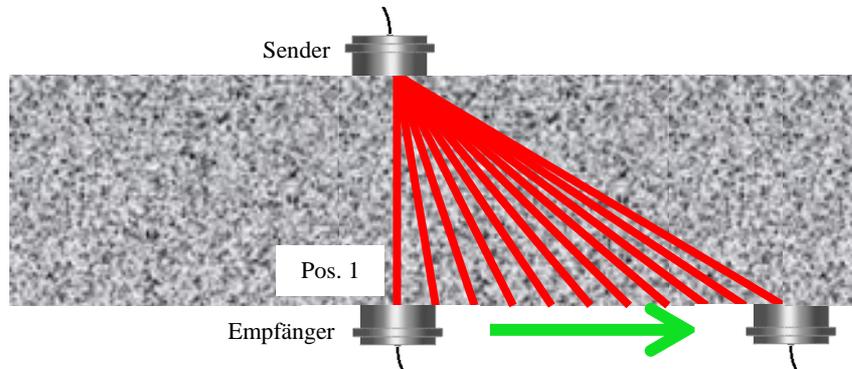


Abb. 8: einfacher Messaufbau zur Erfassung der Schallfeldschwächung verschiedener Prüfköpfe

Da die Schallschwächung aufgrund der Laufwegsverlängerung bei der Verschiebung des Prüfkopfes vom Sender weg für beide Prüfköpfe den gleichen Einfluss hat, kann aus der auf die Referenzamplitude bezogene Amplitude jeden Ortes auf die Schwächung des Schallfelds und somit indirekt auf die Fokussierung geschlossen werden.

Das Ergebnis der Messungen ist in Abb. 9 dargestellt.

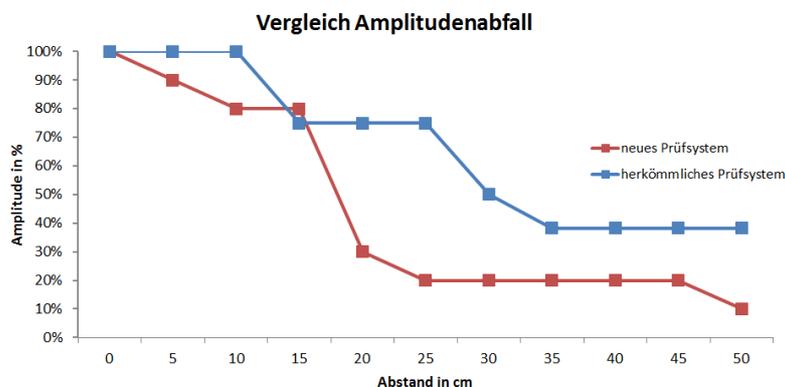


Abb. 9: Vergleich des Amplitudenabfalls herkömmlicher Prüftechnik mit dem neu entwickelten Prüfsystem

Aus Abb. 9 ist ersichtlich, dass bei einem herkömmlichen Prüfsystem der Amplitudenabfall hauptsächlich aus der Laufwegsverlängerung und der damit verbundenen Amplitudenschwächung zurückzuführen ist. Betrachtet man hingegen das neu entwickelte Prüfsystem, ist ab ca. 15 cm ein deutlicher Amplitudenabfall zu erkennen, der sich mit den CIVA Simulationen des Schallfelds in Abb. 7 nahezu deckt.

Sind die Amplitudenverhältnisse bei 15 cm noch nahezu gleich, unterscheiden sich die Amplituden bei 20 cm schon ungefähr um den Faktor 2.5. Sollte sich dieses Ergebnis in weiteren Untersuchungen bestätigen, wäre im ersten Schritt eine Fokussierung der Prüftechnik erfolgreich gelungen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die zuverlässige Risstiefenbestimmung an Betonbauteilen stellt heutzutage noch immer eine Herausforderung dar. Darum wurden die in der Praxis etablierten

Ultraschallprüftechniken metallischer Werkstoffe analysiert und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf mineralische Werkstoffe mithilfe der Simulationssoftware CIVA untersucht. Auf diesem Weg wurde eine erfolgversprechende Kombination der gängigen Prüftechniken auf Basis von theoretischen Modellierungen entwickelt, deren praktische Tauglichkeit hinsichtlich einer Fokussierung im ersten Schritt grundsätzlich nachgewiesen wurde.

Die nächsten Schritte liegen nun darin, sowohl das Schallfeld dieser Prüftechnik bei Senkrechteinschallung als auch bei Schrägeinschallung exakt zu vermessen sowie Serienuntersuchungen an Testkörpern mit definierten Nuten durchzuführen, um die Prüftechnik weiterzuentwickeln und zu validieren. Anschliessend bietet es sich an, auch Transversalwellenprüfköpfe nach gleicher Idee zu entwickeln, um diese Art der Prüftechnik für die Risstiefenbestimmung in der Praxis zu etablieren.

8 Referenzen

- [1] BS 1881-203:1986, Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete; zurückgezogen und ersetzt durch [2]
- [2] BS EN 12504-4:2004 „Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity“
- [3] Pinto, R. C. A.; Medeiros, A.; Padaratz, I. J. und P. B. Andrade: „Use of Ultrasound to Estimate Depth of Surface Opening Cracks in Concrete Structures“; entnommen: www.ndt.net/article/ndtnet/2010/10_Pinto.pdf
- [4] Friese, M.; Effner, U.; Nowak, T. und F. Mielentz: „Erfolgskontrolle von Rissinjektionen durch Ultraschallmessungen“; Manuskript zum Poster P5 der Fachtagung Bauwerksdiagnose, 18. – 19. Februar 2010, Berlin; entnommen: www.ndt.net/article/bau-zfp2010/papers/p05.pdf
- [5] Friese, M.; Vogdt, F. U. und H. Wiggenhauser: „Qualitätssicherung für Rissfüllungen: ein neuer Ansatz mit bildgebenden Ultraschallverfahren“ in Beton- und Stahlbetonbau 106 Heft 7 (2011) pp. 471–480
- [6] Mielentz, Frank, Milmann, Boris, Krause, Martin, Müller, W. und S. Crail: „Zerstörungsfreie Risscharakterisierung in Betonbauteilen mit Ultraschall“ Posterbeitrag 24. In: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.): Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 2001 (DGZfP-Berichtsband 76 auf CD)