

# Entwicklung einer Bohrlochsonde für Ultraschalluntersuchungen an Abschlussbauwerken in Endlagern

Frank MIELENTZ<sup>1</sup>, Heiko STOLPE<sup>1</sup>, Ute EFFNER<sup>1</sup>, Matthias BEHRENS<sup>1</sup>,  
Thomas BERNSTEIN<sup>1</sup>, Ernst NIEDERLEITHINGER<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin

Kontakt E-Mail: frank.mielentz@bam.de

**Kurzfassung.** Für die Qualitätssicherung von Abschlussbauwerken für Endlager wird eine Ultraschall-Bohrlochsonde entwickelt. Mithilfe dieser Sonde, die aus einer Vielzahl von einzelnen koppelmittelfreien Ultraschall-Punktkontaktprüfköpfen besteht, soll die Rissfreiheit der Versuchsbauwerke überprüft werden.

Ein erster Prototyp der Sonde wurde mit einem kommerziellen Ultraschallgerät betrieben und bestand aus 12 Transversalwellen-Punktkontaktprüfköpfen von denen jeweils sechs als Sender und sechs als Empfänger parallelgeschaltet waren. Um den erzeugten Schalldruck der Bohrlochsonde zu steigern, wurde bei der Neuentwicklung die Prüfkopfanzahl erhöht und zusätzlich die laufzeitgesteuerte Anregung der einzelnen Prüfköpfe vorgesehen. Für die Anregung der Prüfköpfe mit programmierten Zeitverzögerungen wurde ein neuartiger mehrkanaliger Sender für bipolare Rechtecksignale entwickelt.

Durch die Entwicklung der Bohrlochsonde soll eine dynamische Anpassung der Prüfkopf-Apertur sowie eine Fokussierung des Schallfeldes in Abhängigkeit der zu untersuchenden Tiefe erfolgen. Mithilfe entsprechender Anregungsfunktionen kann das Schallfeld der Bohrlochsonde unterschiedlich geformt werden, z. B. ist auch ein Schwenken des fokussierten Schallbündels möglich. Dadurch wird das erfasste Prüfvolumen begrenzt und auf diese Weise das Signal-Störverhältnis der Empfangssignale verbessert. In Kombination mit SAFT-Rekonstruktionsrechnungen wird durch eine optimierte Abstrahlcharakteristik der Sonde mit einem hohen Schalldruck unter verschiedenen Winkeln eine verbesserte Signalqualität und damit eine erhöhte Aussagesicherheit der Ergebnisse in der Objektabbildung erwartet.

## Einführung

Für die Qualitätssicherung von Abschlussbauwerken wird eine Ultraschall-Bohrlochsonde entwickelt. Mithilfe dieser Sonde, die aus einer Vielzahl von einzelnen koppelmittelfreien Ultraschall-Punktkontaktprüfköpfen besteht, soll die Rissfreiheit von Abschlussbauwerken in Endlagern überprüft werden.

Um die Dichtheit der Abschlussbauwerke zu gewährleisten, müssen die verwendeten Materialien, die technische Ausführung sowie die Qualitätssicherung beim Bau und die anschließende Überwachung untersucht werden. Da im bisher verwendeten Salzbeton Risse aufgrund von Schwinden und/oder Wärmeentwicklung entstanden sind und dies auch bei alternativen Materialien nicht auszuschließen ist, ist eine Kontrolle der Abdichtbauwerke



notwendig [1]. Die Entwicklung der Bohrlochsonde zielt zunächst auf die Untersuchung von Versuchsbauwerken, da die Dichtwirkung von Realbauwerken nicht durch Bohrkernentnahme beeinträchtigt werden darf.

## 1. Aufbau der Bohrlochsonde

Ein erster Prototyp der Sonde wird mit einem kommerziellen Ultraschallgerät betrieben und besteht aus 12 Transversalwellen-Punktkontaktprüfköpfen, von denen jeweils sechs als Sender und sechs als Empfänger parallelgeschaltet sind (s. **Abbildung 1**, links). Über zwei Kunststoff-Rundteile wird die Sonde an einer Schiene in die gewünschte Tiefe geschoben und dort pneumatisch an das umgebende Material angekoppelt.



**Abbildung 1:** Bohrlochsonden (unterschiedliche Ausführungen)

**Abbildung 2** zeigt einen einzelnen Vorverstärker mit Gehäuse, wie er für die Verstärkung der Ultraschallsignale der Bohrlochsonde der ersten Generation Verwendung findet; die Speisung des Verstärkers erfolgt über die Signalleitung.



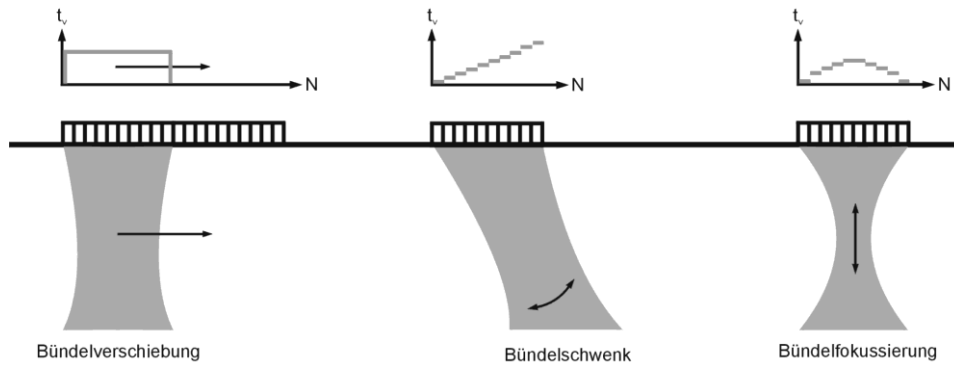
**Abbildung 2:** Vorverstärker für Ultraschallsignale

Um den erzeugten Schalldruck der Bohrlochsonde zu steigern, wurde bei der Neuentwicklung die Prüfkopfanzahl erhöht und zusätzlich die laufzeitgesteuerte Anregung der einzelnen Prüfköpfe vorgesehen (s. **Abbildung 1**, rechts).

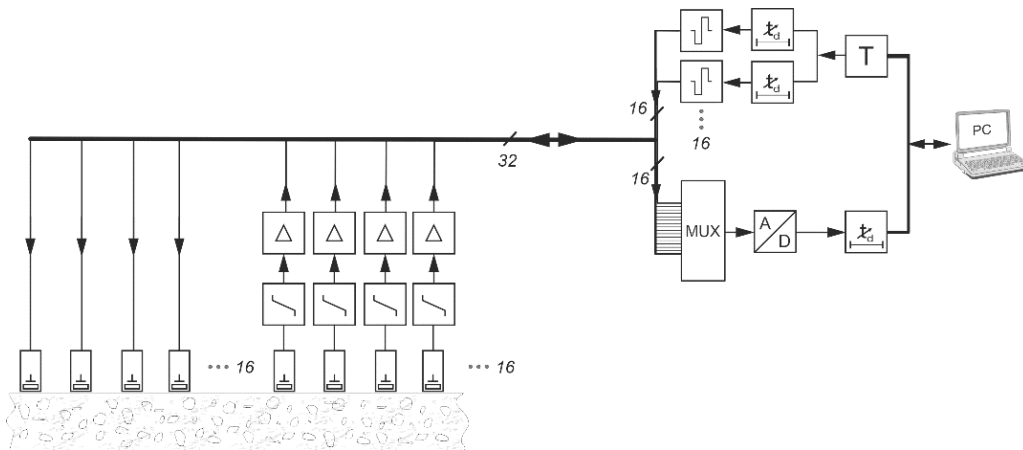
Durch die Weiterentwicklung der Bohrlochsonde soll mithilfe der Gruppenstrahlertechnik eine dynamische Anpassung der Prüfkopf-Apertur sowie eine Fokussierung des Schallfeldes in Abhängigkeit der untersuchten Tiefe erfolgen. Mithilfe entsprechender Anregungsfunktionen kann das Schallfeld der Bohrlochsonde unterschiedlich geformt werden, z. B. ist auch ein Schwenken des fokussierten Schallbündels möglich. Dadurch wird das erfasste Prüfvolumen begrenzt und auf diese Weise das Signal-Störverhältnis der Empfangssignale verbessert [2].

**Abbildung 3** zeigt schematisch die Möglichkeiten der Schallfeldbeeinflussung beim laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahler. Für jedes Schwingerelement der Bohrlochsonde ist praktisch ein komplettes Ultraschallgerät notwendig, das mit vorgegebener Verzögerungszeit Ultraschall-Sendesignale abstrahlt, mit einem für alle Geräte gemeinsamen Takt. Zurzeit ist die Ansteuerung der Prüfköpfe und die Datenerfassung noch nicht in das Gehäuse der Bohrlochsonde integriert. Für Weiterentwicklungen der

Bohrlochsonde ist die Elektronik bereits für 16 Kanäle ausgelegt. **Abbildung 4** zeigt das Blockschaltbild des Gruppenstrahler-Messsystems mit der Bohrlochsonde.

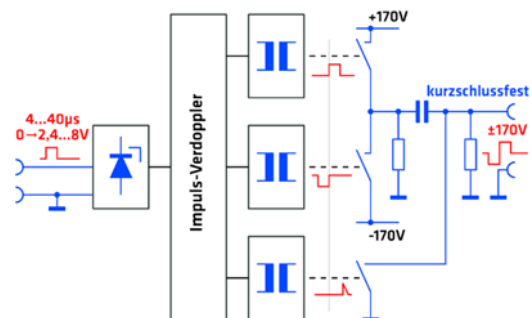


**Abbildung 3:** Möglichkeiten der Schallfeldbeeinflussung beim laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahler



**Abbildung 4:** Laufzeitgesteuerter Ultraschall-Gruppenstrahler (Blockschaltbild)

Für die Anregung der Prüfköpfe mit programmierten Zeitverzögerungen wurde ein neuartiger mehrkanaliger Sender für bipolare Rechtecksignale entwickelt. **Abbildung 5** zeigt einen Einschub des mehrkanaligen Hochspannungssenders und das Blockschaltbild einer einzelnen Sendestufe.

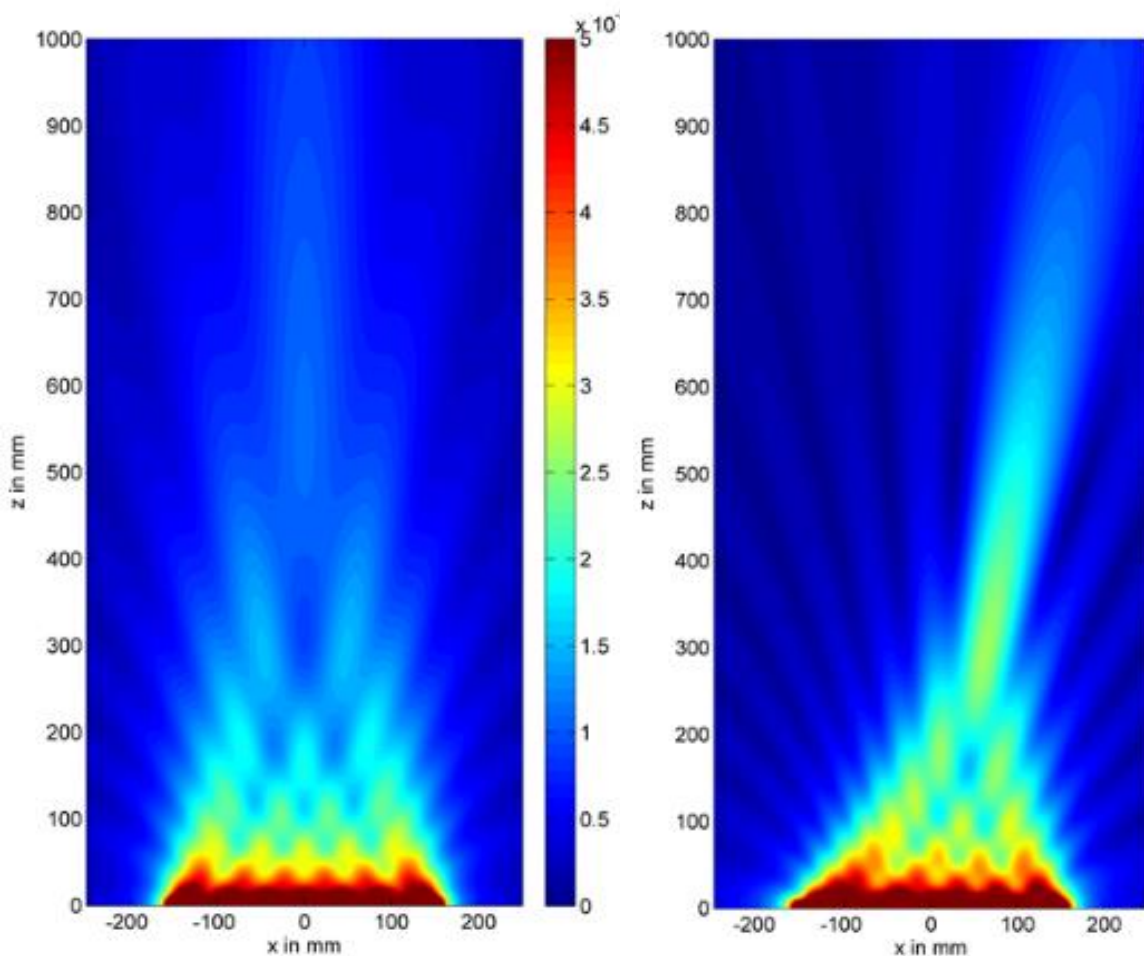


**Abbildung 5:** Einschub des mehrkanaligen Senders (links) und Blockschaltbild einer Sendestufe (rechts)

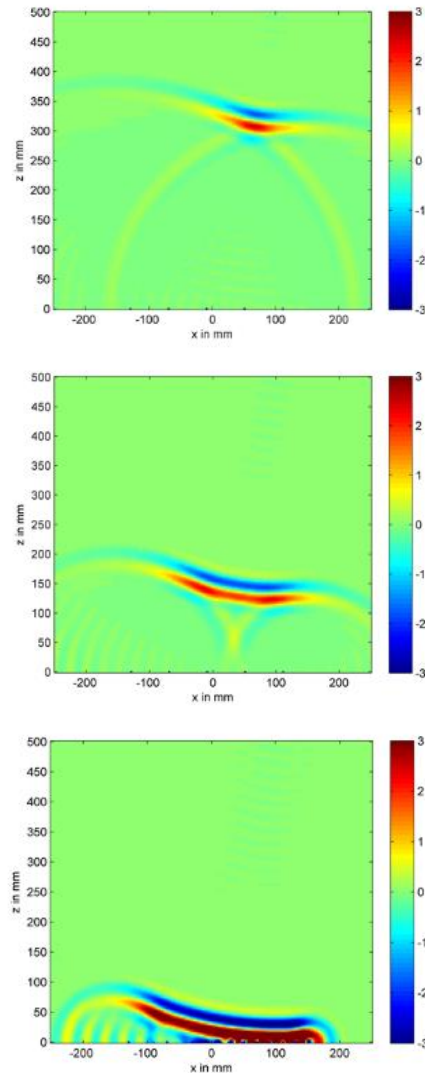
## 2. Schallfeld Modellierung

Mit der Punktquellensynthese lassen sich die Schallfelder beliebiger Prüfkopfanordnungen realitätsnah dreidimensional modellieren, wobei die Prüfköpfe, wie beim zeitlich gesteuerten Gruppenstrahler, auch zeitlich gegeneinander verzögerte Anregungen besitzen können [3], [4]. Durch die Modellierung kann beispielsweise der Schwenkbereich für verschiedene Prüfkopfanordnungen untersucht und eine für die Anwendung optimierte Anordnung gefunden werden. Mithilfe von Modellierungen werden die notwendigen Verzögerungszeiten der Sendeimpulse für die einzelnen Schwingererelemente berechnet und für die automatisierte Prüfung mit Bildgebung in einer „Look-Up-Tabelle“ gespeichert.

**Abbildung 6** zeigt das Ergebnis der Schallfeldmodellierung für eine Fokussierung unter einem Schwenkwinkel von 11 Grad und **Abbildung 7** die Simulation der Wellenausbreitung.



**Abbildung 6:** Modellierung der Schallfelder (links: ohne Fokussierung, rechts: mit Fokussierung, Schwenkwinkel 11 Grad)



**Abbildung 7:** Simulation der Wellenausbreitung (Fokussierung, Schwenkwinkel 11 Grad)

### 3. Ausblick

Zum Testen der Bohrlochsonde im Labor werden zurzeit großformatige Testkörper gebaut. Für unterschiedliche Arrayanordnungen der Punktcontactprüfköpfe sollen experimentell die Möglichkeiten der Schallfeldformung untersucht und mit den Modellierungsstudien verglichen werden. Geplant sind Schallfeldprofilmessungen an Betontestkörpern unterschiedlicher Dicken in Durchschallung entlang von Linien senkrecht zur akustischen Achse des Gruppenstrahlers.

An konkreten Prüfaufgaben soll die Aussagesicherheit studiert werden. Für die Erfassung und Auswertung der Messsignale ist der Einsatz der Gruppenstrahlertechnik in Kombination mit SAFT-Rekonstruktionsrechnungen geplant [5]. Ein möglichst großer Divergenzwinkel der Bohrlochsonde kann durch einen Winkelschwenk der Hauptkeule des Schallfeldes erreicht werden, mit dem Vorteil eines geringen Schalldruckabfalls auch unter größeren Winkeln. In Kombination mit SAFT-Rekonstruktionsrechnungen wird durch die optimierte Abstrahlcharakteristik der Sonde eine verbesserte Signalqualität und damit eine erhöhte Aussagesicherheit der Ergebnisse in der Objektabbildung erwartet.

#### 4. Literatur

- [1] Effner, U., Mielentz, F., Niederleithinger, E., Friedrich, Ch., Mauke, R., Mayer, K.: *Prüfung von Abdichtbauwerken für Endlager auf Risse – eine Herausforderung/ Testing repository engineered barrier systems for cracks - a challenge*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik/ Materials Science and Engineering Technology, zur Veröffentlichung angenommen, DOI: 10.1002/mawe.202000118
- [2] Mielentz, F.; Feller, V.; Krause, M.; Orglmeister, R.: *Ultraschallprüfung von Betonbauteilen, Laufzeitgesteuerte Gruppenstrahler mit Punktkontaktprüfköpfen*. Z. MP Materials Testing, Hanser-Verlag München (2015) Band 57, Ausgabe 4, S. 329-336, DOI 10.3139/120.110723.
- [3] Spies, M.; Walte, F.; Hübschen, G.: *Einsatz der generalisierten Punktquellen-Synthese zur Vorbereitung automatischer Ultraschallprüfungen*. In: Deutsch-Französisches Seminar Automatisierung und Modellierung für die Zerstörungsfreie Prüfung, Aachen, 17.-18. März 1997.
- [4] Mielentz, F.; Feller, V.; Krause, M.; Orglmeister, R.; Mayer, K.: *Schallfeldmodellierung von Ultraschall-Transversalwellen-Prüfköpfen - Modellierung von Prüfkopfarrays mit der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik und der Punktquellensynthese*. Z. MP Materials Testing, Hanser-Verlag München (2013) Band 55, Heft 11-12, S. 856-864, DOI: 10.3139/120.110510.
- [5] Schickert, M.; Krause, M.; Müller, W.: *Ultrasonic imaging of concrete elements using reconstruction by synthetic aperture focusing technique*. Z. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, Nr. 15, S. 235–246.

# Entwicklung einer Bohrlochsonde für Ultraschalluntersuchungen

F. Mielentz, H. Stolpe, U. Effner, M. Behrens, T. Bernstein, E. Niederleithinger

**Für die Qualitätssicherung von Abschlussbauwerken für Endlager wird eine Ultraschall-Bohrlochsonde entwickelt. Mithilfe dieser Sonde, die aus einer Vielzahl von einzelnen koppelmittelfreien Ultraschall-Punktkontaktprüfköpfen besteht, soll die Rissfreiheit der Versuchsbauperke überprüft werden.**

Ein erster Prototyp der Sonde wird mit einem kommerziellen Ultraschallgerät betrieben und besteht aus 12 Transversalwellen-Punktkontaktprüfköpfen, von denen jeweils sechs als Sender und sechs als Empfänger parallelgeschaltet sind.



Prototyp II der Bohrlochsonde

Beim Prototyp II wurde die Anzahl der Prüfköpfe erhöht und die Anordnung der Prüfköpfe in der Bohrlochsonde verändert.

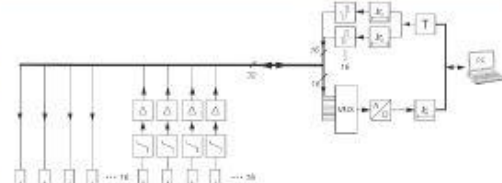


Prototyp I der Bohrlochsonde



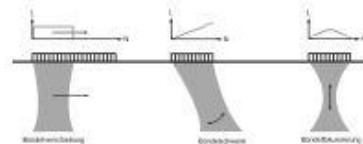
Vorverstärker für Ultraschallsignale

Ein in die Sonde integrierter Vorverstärker wird über die Prüflinien mit Spannung versorgt.



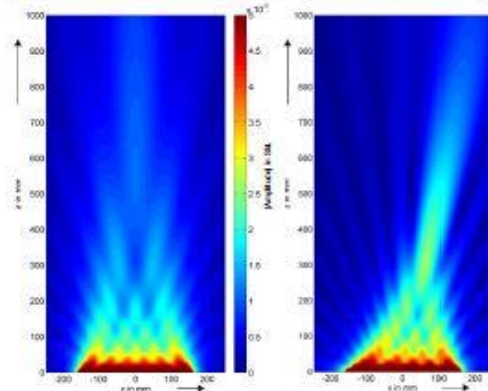
Leitzeitgesteuerter Ultraschall-Gruppenstrahler (Blockschaltbild)

Um den Schalldruck der Bohrlochsonde zu steigern, wird bei der Neuentwicklung die Prüfkopfanzahl auf 16 erhöht und zusätzlich die leitzeitgesteuerte Anregung der einzelnen Prüfköpfe vorgesehen.



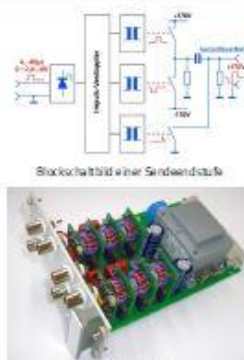
Möglichkeiten der Schallfeldbeeinflussung beim leitzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern

**In Kombination mit SAFT-Rekonstruktionsrechnungen wird durch eine optimierte Abstrahlcharakteristik der Sonde mit einem hohen Schalldruck unter verschiedenen Winkeln eine verbesserte Signalqualität und damit eine erhöhte Aussagesicherheit der Ergebnisse in der Objektabbildung erwartet.**



Modellierung der Schallfelder (links: ohne Fokussierung, rechts: mit Fokussierung, Schwenkwinkel 11 Grad)

Mithilfe entsprechender Anregungsfunktionen kann das Schallfeld der Bohrlochsonde unterschiedlich geformt werden, z. B. ist auch ein Schwenken des fokussierten Schallbündels möglich.

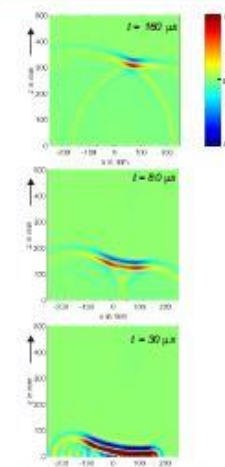


Blockschaltbild einer Sendendstufe



Einschubmodul mehrkanaliger Senders

Für die Anregung der Prüfköpfe wurde ein neuartiger mehrkanaliger Sender für bipolare Rechtecksignale entwickelt.



Simulation der Wellenausbreitung (Fokussierung, Schwenkwinkel 11 Grad)

Sicherheit in Technik und Chemie

www.bam.de