

Charakterisierung von Schallemissions-Sensoren für den Einsatz in Bergwerken und an Gesteinsproben

Daniel DÖRNER *, Gerd MANTHEI *, Joachim PHILIPP **

* Technische Hochschule Mittelhessen (THM), Gießen

** Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik mbH (GMuG), Bad Nauheim

Kontakt: d.doerner@gmug.eu

Kurzfassung. Bei Schallemissionsmessungen (SE-Messungen) in Bergwerken bzw. an Gesteinsproben spielt die Kalibrierung der verwendeten Schallemissions-Sensoren (SE-Sensoren) bei der Bestimmung der Stärke (Magnitude) eines akustischen Events eine entscheidende Rolle.

Für die Bestimmung der Sensoreigenschaften im Labor wird in der Regel eine Platte bekannter Größe bzw. Dicke und bekannten Materials (z.B. Beton, Marmor, Plexiglas) durchschallt. Die Signalquelle wird an einer der beiden Seiten der Platte angebracht. Als Signalquellen werden dabei z.B. Brüche von Glaskapillaren, piezokeramische Sender, aber auch andere Schallquellen verwendet. Die Position des zu charakterisierenden Sensors (Empfängers) kann dann auf der gegenüberliegenden Seite der Platte entlang eines linearen Profils variiert werden, wodurch unterschiedliche Laufwege durch das Material mit unterschiedlichen Einfallswinkeln des akustischen Signals ermöglicht werden.

Aus den empfangenen Signalen, die in Form von Seismogrammen bzw. Sonogrammen dargestellt werden, lässt sich die Empfindlichkeit des verwendeten SE-Sensors in Abhängigkeit von Frequenz und Einfallswinkel bestimmen. Außerdem ist eine Analyse des empfangenen Signals möglich, z.B. hinsichtlich seines Frequenzgehalts im Vergleich zum emittierten Signal und seiner Amplitude. Eigenschaften des Plattenmaterials, wie z.B. die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung der beobachteten elastischen (hier akustischen) Wellen, können ebenfalls bestimmt werden.

Im hier präsentierten Poster werden verschiedene SE-Sensortypen miteinander verglichen. Dabei werden sowohl die für SE-Messungen üblichen resonanten SE-Sensoren als auch breitbandige Sensoren als Empfänger verwendet. Ein breitbandiger Ultraschallprüfkopf als Sender emittiert dabei Signale, deren Form und Frequenzbereich bekannt sind.

1 Motivation

Bei der Frage nach der Dauerhaftigkeit bzw. Stabilität von Bauwerken aus Beton (z.B. Brücken, Pfeiler, Gebäude usw.) spielen die Korrosion von Stahlbeton und die Rissbildung eine wichtige Rolle. Visuell erkennbare Schäden an Betonbauten treten dabei meist erst Jahre nach der Fertigstellung der Bauten auf. Die Ursachen für Schäden in Stahlbeton sind vielfältig (Frostschäden, Einwirkung chemischer Substanzen aus dem Boden bzw.



Grundwasser u.a.). Auch andere Einflüsse, z.B. die Nutzung der Betongebäude, die Beanspruchung von Bauteilen, aber auch Konstruktions- und Ausführungsfehler, können zu Schäden im Stahlbeton führen. Diese Schäden können nun zu Rissbildungen und Abplatzungen innerhalb des Stahlbetons führen, wodurch die Stabilität der Betonbauten gefährdet wird.

Ein Verfahren, um die Rissbildung infolge zu hoher Beanspruchung von Bauteilen zu verfolgen und dadurch Aussagen über die Stabilität treffen zu können, ist die Schallemissionsanalyse (SEA). Diese beruht auf der Erscheinung, dass bei Verformungsvorgängen, Rissbildung und Risswachstum in einem Material kurze Schallimpulse ausgesandt werden. Die dabei emittierten Schallimpulse sind im Allgemeinen sehr klein, so dass empfindliche Sensoren wie piezoelektrische Aufnehmer verwendet werden müssen, um die Schallimpulse aufnehmen zu können. Es konnte festgestellt werden, dass fast alle Materialien (z.B. Metalle, Keramik, Glas, Verbundwerkstoffe, Steinsalz und auch Beton) bei Belastung Schallimpulse emittieren. Die SEA hat sich dabei zu einem etablierten Verfahren zur standardisierten Untersuchung von Rissbildung und -wachstum entwickelt, wobei die Einsatzmöglichkeiten vielfältig sind. So können nicht nur Betonbauwerke untersucht werden. Auch ein Einsatz im Reaktor- und Behälterbau, d.h. für Stahl und faserverstärkte Kunststoffe ist möglich. Darüber hinaus wird die SEA im Bereich der Endlagererkundung eingesetzt. So kann mit Hilfe der SEA in Salzbergwerken die natürliche akustische Aktivität beobachtet und lokalisiert werden. Durch diese Messungen sind dann Aussagen über mögliche Schwächungszonen im Überwachungsbereich möglich, was für die Beurteilung der Stabilität und Nutzbarkeit als Lager für Gefahrgut aller Art von Bedeutung ist.

Das Potential der SEA liegt dabei darin begründet, dass Schädigungsprozesse und Zustandänderungen erkannt werden können. Sie liefert Auskünfte über den Ort, die Ausdehnung und Fortschritte einer Schädigung. Im Idealfall (bei klar erkennbaren SE-Signalen) kann der Schaden auch klassifiziert und quantifiziert werden, so dass die Auswirkungen auf die Sicherheit einer Konstruktion und eventuelle Instandsetzungsmaßnahmen beurteilt werden können.

Die SEA ist also ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, durch das das vorzeitige Versagen von Bauteilen durch Detektion von Mikrorissen angezeigt werden kann. Bei einer vielkanaligen Registrierung der ausgesandten Signale kann sogar eine Ortung der Schallquellen vorgenommen werden. Dadurch kann die Entwicklung einer makroskopischen Rissfläche beobachtet werden.

2 Schallemissionsanalyse in Beton

Beton ist für die Schallemissionsanalyse (SEA) ein schwieriges Material, da er wegen seiner unregelmäßigen Geometrie und Zusammensetzung elastische Wellen stark dämpft. Außerdem verkomplizieren bereits vorhandene Risse und eingelegte Bewehrungen die Wellenausbreitung zusätzlich, weshalb weiterführende Filtermethoden nötig sind, um Störsignale von Nutzsignalen zu trennen. Trotzdem kann die SEA erfolgreich an Bauelementen aus Beton eingesetzt werden, wobei der Überwachungsbereich aufgrund der geringen Schallleitfähigkeit von Stahlbeton nur eine Dimension von einigen Metern beträgt. Soll ein größeres Betonbauwerk vollständig überwacht werden, ist daher eine große Anzahl von SE-Aufnehmern nötig.

Rissbildung in Beton kann durch SE-Messungen im Frequenzbereich von einigen Kilohertz an Betonwerken und bis zu 150 kHz an Laborproben direkt gemessen werden.

Für die Detektion von Mikrorissen in Betonstrukturen ist die Empfindlichkeit der SE-Aufnehmer von entscheidender Bedeutung. Oft werden bei der Anwendung der SEA an

Beton empfindliche, aber schmalbandige SE-Aufnehmer verwendet. Diese messen in einem sehr engen, dem Beton nicht angepassten Frequenzbereich. Dabei ist zu erwarten, dass breitbandige SE-Aufnehmer die Signale und damit die Ersteinsätze der Wellen wesentlich klarer und formtreuer wiedergeben als die schmalbandigen Aufnehmer. Die zur Lokalisierung der Schallquelle notwendigen Ersteinsätze (P-Wellen) schwingen schärfer an und lassen sich dadurch leichter erkennen. Ein störendes Nachschwingen tritt bei breitbandigen Messungen nicht auf und die später einsetzende Transversalwelle (S-Welle) kann ebenfalls zur Ortung der Schallquelle verwendet werden. Die abgestrahlte elastische Energie ist hauptsächlich im Signal der Logitudinal- und im Signal der Transversalwelle (P- und S-Einsatz) enthalten. Die Ortung einer Schallquelle wird verbessert, wenn beide Wellentypen zur Ortung herangezogen werden, da mehr Einsatzzeiten zur Verfügung stehen als bei einer Ortung nur mit der Longitudinalwelle. Es ist daher zu erwarten, dass die Ergebnisse von breitbandigen Messungen ein vollständigeres Bild über die verursachenden Mechanismen der Rissbildung und Rissentwicklung und damit über die während der Belastung ablaufenden Rissprozesse liefern als die Ergebnisse von schmalbandigen Messungen.

3 Methodik

Die Messung von Schallfeldern beruht auf der Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie. Die Art und Weise, wie diese Umwandlung erfolgt, ist die wichtigste Eigenschaft des Wandlers. In der Praxis wird zwischen elektromagnetischen, elektrodynamischen und elektrostatischen sowie magnetostriktiven und piezoelektrischen Wandlern unterschieden. Für den Nachweis von Schallemission sind wegen der kleinen Abmessungen, großen Empfindlichkeit und hohen Eigenfrequenz piezoelektrische Wandler besonders geeignet. Dabei ist es möglich, aus dem Angebot der piezoelektrischen Materialien jenes auszuwählen, das aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften am besten für die konkrete Aufgabenstellung geeignet ist. Mögliche Wandlormaterialien können Bleimetannibat, Bariumtitanat oder Lithiumniobat sein. Durch die Resonanzfrequenz des ausgewählten Materials sind dann die geometrischen Abmessungen des piezoelektrischen Wandlers festgelegt.

Um elektrische Einstreuungen zu verhindern, wird der Wandler in ein Metallgehäuse eingebaut, welches das Wandlerelement auch vor Verschleiß und mechanischen Stößen schützt. Soll der Aufnehmer bedämpft werden, um die Breitbandigkeit zu erhöhen, so wird auf der Rückseite der piezoelektrischen Scheibe ein Dämpfungsmaterial angebracht.

Im August 2013 werden nun an einer Betonwand Durchschallungsmessungen mit unterschiedlichen, definierten Signalen durchgeführt. Dabei kommen verschiedene SE-Aufnehmer zur Messung des emittierten Signals zum Einsatz, die sich in ihren Eigenschaften, z.B. dem nutzbaren Frequenzbereich, unterscheiden. Ziel dieser Untersuchung ist es unter anderem, zu überprüfen, welcher der SE-Aufnehmer für Messungen an Beton am besten geeignet ist, vor allem vor dem Hintergrund des vom Aufnehmer abgedeckten Frequenzbereichs.

Bei der Bewertung der verschiedenen Aufnehmertypen ist es wichtig, dass das Aufnahmerverhalten bekannt ist. Die Aufnehmer können sich in ihrer absoluten, spektralen und richtungsabhängigen Empfindlichkeit unterscheiden. Zur Charakterisierung der Empfängereigenschaften ist es zum Beispiel möglich, das definierte Sendesignal mit dem empfangenen Signal zu vergleichen.

4 Beispiel

Die folgenden acht Abbildungen zeigen Testprofile, die auf einer Marmorplatte gemessen wurden. Für alle acht Profile wurde der gleiche piezoelektrische Sender verwendet, der auf der Unterseite der Marmorplatte fest installiert wurde. Mit dem für alle Profile gleichen piezoelektrischen Aufnehmer wurde dann entlang eines linearen Profils an der Oberseite gemessen. Der Startpunkt der Profile befand sich über der Position des Senders ($x = 0$ cm), von wo aus sich der Empfänger mit jedem weiteren Messpunkt weiter vom Zentrum des Profils (Position des Senders) entfernte. Für jeden Messpunkt des Profils wurde dabei ein Seismogramm bzw. Sonogramm aufgezeichnet. Alle Seismogramme des entsprechenden Profils wurden dann gemeinsam, sortiert nach der Entfernung, in einer Abbildung zusammengefasst.

In allen acht Abbildungen wurde das gleiche Profil vermessen, es wurden aber unterschiedliche Sendesignale verwendet. Bei dem Profil, das in Abbildung 1 dargestellt wird, wurde ein Stufensignal verwendet. In den folgenden Profilen (Abbildungen 2 bis 8) wurden geformte Signale mit Mittenfrequenzen von 35 kHz, 50 kHz, 70 kHz, 100 kHz, 140 kHz, 200 kHz und 280 kHz verwendet. Die Sendesignale wurden also immer hochfrequenter. In den Abbildungen ist gut zu erkennen, dass sich die aufgezeichneten Signale abhängig vom Ausgangssignal deutlich voneinander unterscheiden, sowohl in Bezug auf die Amplitude als auch in Bezug auf den Frequenzgehalt. In den Abbildungen ist auch die Trennung der schnelleren P-Wellen von den langsameren S-Wellen an den unterschiedlichen Einsatzzeiten gut zu erkennen, wobei sich zeigt, dass diese Trennung deutlicher wird, je hochfrequenter das verwendete Sendesignal ist. In den Abbildungen 2 und 3 mit den Mittenfrequenzen 35 kHz und 50 kHz sind die unterschiedlichen Einsätze kaum zu erkennen. In den Abbildungen 1 (Stufensignal, Signal mit der größten Frequenz), 7 (Mittenfrequenz = 200 kHz) und 8 (Mittenfrequenz = 280 kHz) sind die verschiedenen Einsätze allerdings sehr deutlich zu erkennen. In den Abbildungen 1 und 8 sind die zu erkennenden Einsätze exemplarisch eingetragen. Die Abbildungen machen deutlich, dass die Zeit, die vergeht, bis die P- bzw. S-Einsätze vom Empfänger aufgezeichnet werden, mit zunehmendem Abstand des Senders vom Empfänger aufgrund der längeren Laufwege immer größer wird. Auch der zeitliche Abstand zwischen dem P- und dem S-Einsatz wird mit zunehmenden Laufwegen immer größer, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der S-Wellen kleiner ist als die der P-Wellen.

Bei den hochfrequenten Sendesignalen (Abbildung 7 und 8) sind neben den P- und S-Einsätzen noch weitere Einsätze gut zu erkennen. Beim ersten dieser Einsätze handelt es sich um den PP-Einsatz, also um eine Longitudinalwelle (P-Welle), die einmal an der Oberfläche der Marmorplatte reflektiert wurde. Bei den anderen Einsätzen könnte es sich um den SS-Einsatz (einmal reflektierte Transversalwelle, S-Welle) oder auch um konvertierte Wellen handeln. Dabei wird eine P-Welle bei der Reflektion an der Oberfläche der Marmorplatte in eine S-Welle konvertiert oder umgekehrt. Auch der PPP-Einsatz (zweimal reflektierte P-Welle) könnte eine mögliche Erklärung sein.

Im Rahmen der im August 2013 anstehenden Messungen werden derartige Profile mit mehreren unterschiedlichen piezokeramischen Aufnehmern an einer Betonwand durchgeführt, um anhand einer genaueren Analyse der empfangenen Signale eine Aussage über die Eigenschaften der verschiedenen Empfänger treffen zu können.

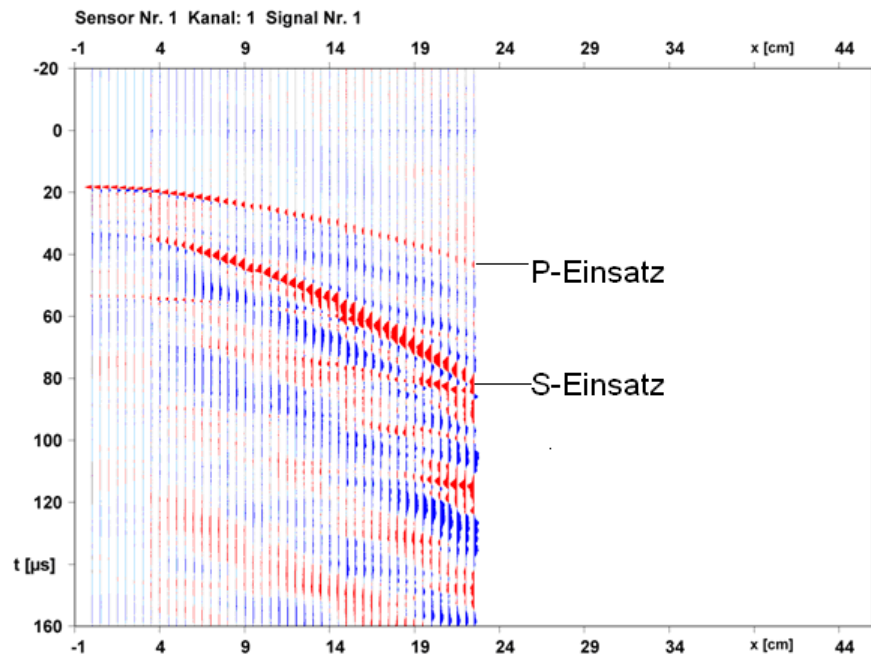


Abbildung 1: Stufensignal

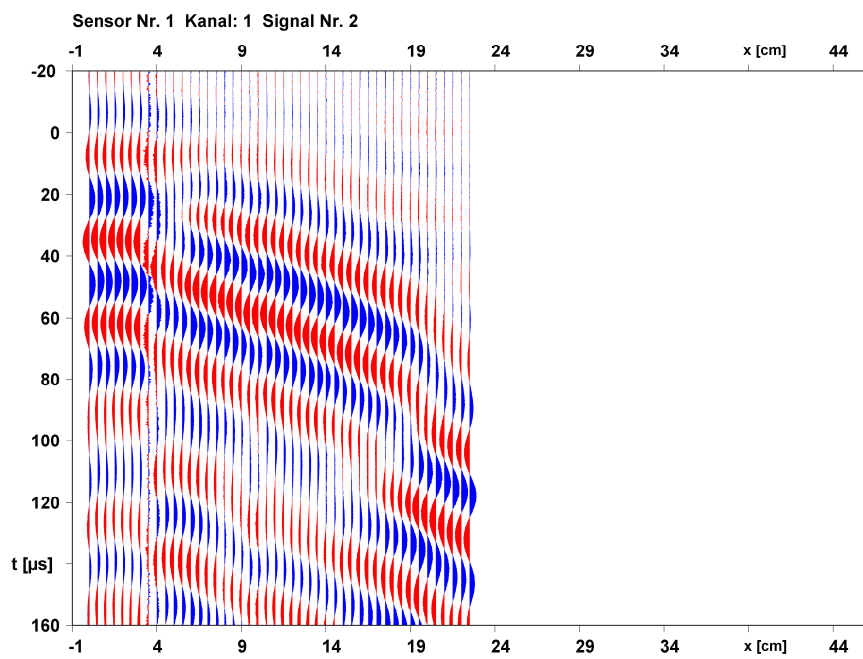


Abbildung 2: Mittenfrequenz = 35 kHz

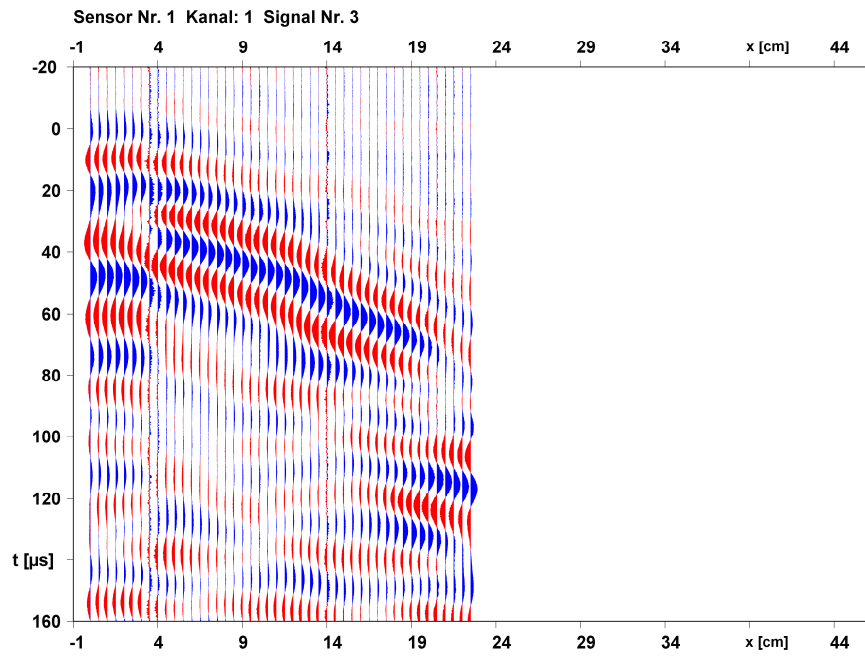


Abbildung 3: Mittenfrequenz = 50 kHz

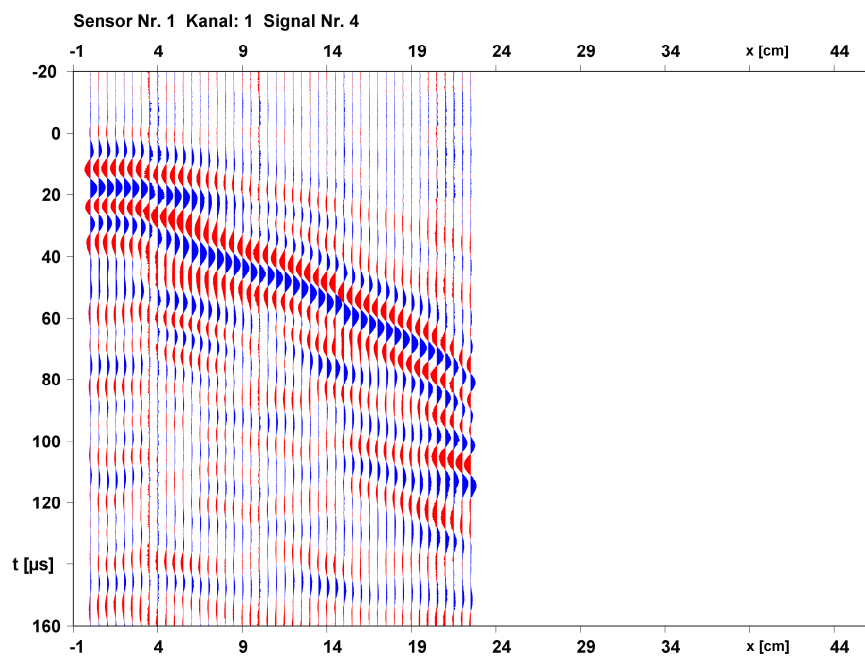


Abbildung 4: Mittenfrequenz = 70 kHz

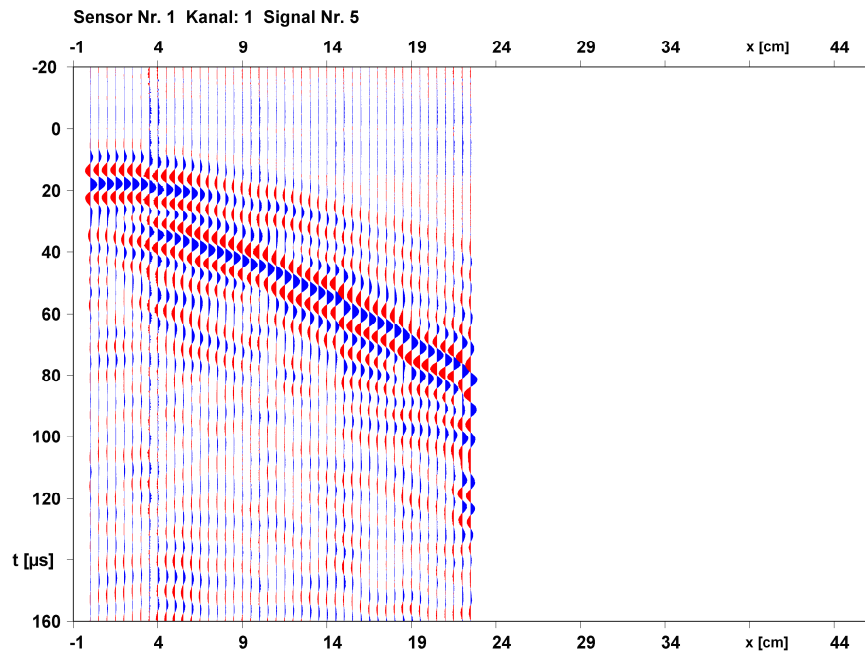


Abbildung 5: Mittenfrequenz = 100 kHz

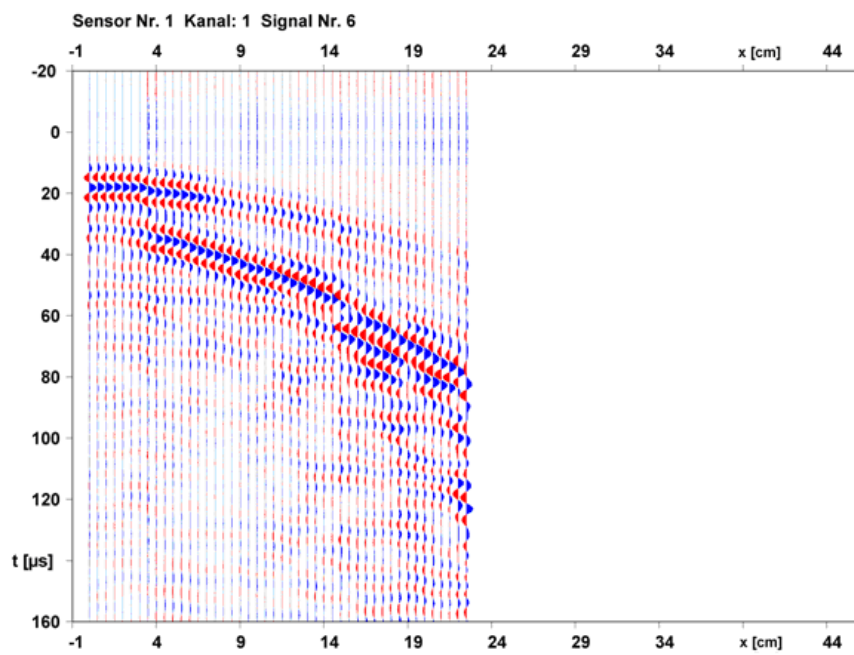


Abbildung 6: Mittenfrequenz = 140 kHz

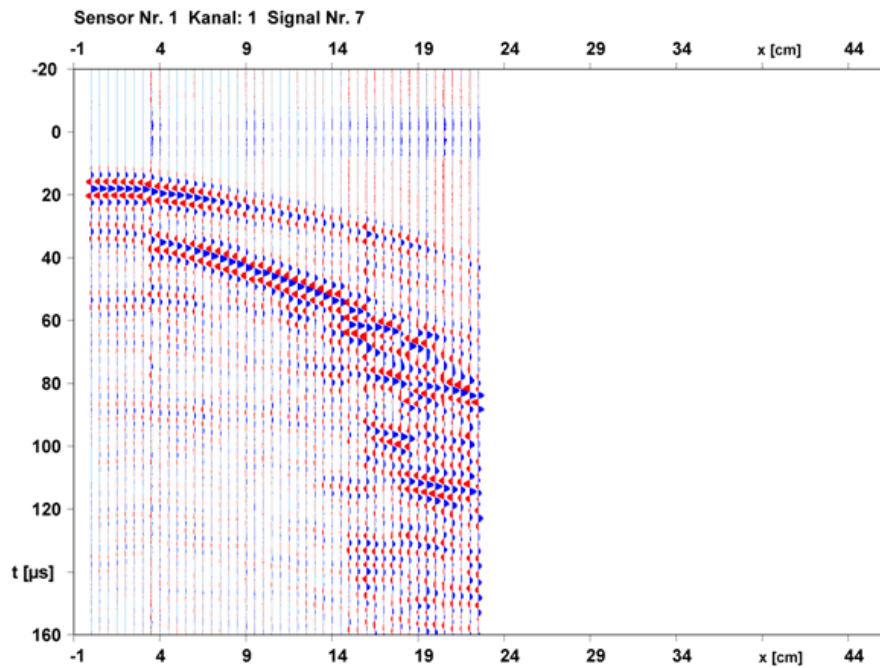


Abbildung 7: Mittenfrequenz = 200 kHz

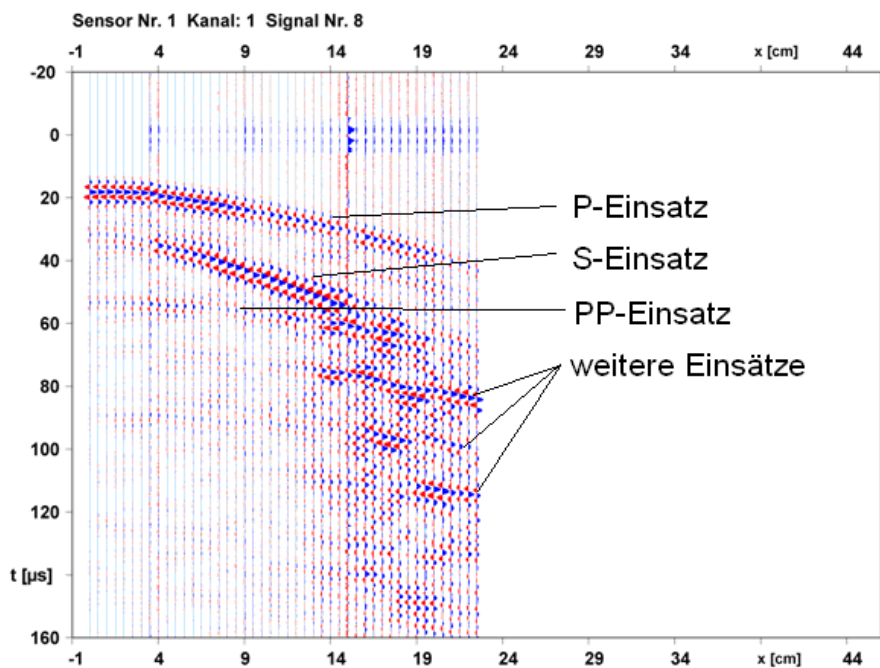


Abbildung 8: Mittenfrequenz = 280 kHz

Referenzen

- [1] G. Manthei, Charakterisierung von breitbandigen Schallemissionsaufnehmern, 17. Kolloquium Schallemission, Bad Schandau, Berichtsband 118-CD der DGZfP, 2009, S. 77-85.
- [2] G. Manthei, Characterisation of Acoustic Emission Sensors, 29th European Conference on Acoustic Emission Testing, Vienna, Austria, 2010.
- [3] G. Manthei, Mikroakustik und Schallemissionen an Salzgesteinproben, 39. Geomechanik-Kolloquium, Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2010-1, S. 57-68.
- [4] G. Manthei, Characterization of AE Sensors for Moment Tensor Analysis, Progress in Acoustic Emission XV, Proc. International Acoustic Emission Conference, Kumamoto University, Kumamoto, Japan, 2010, S. 19-24.