

Simulation der Ausbreitung von Schallemissionssignalen in einem großformatigen Laborprobekörper aus Spannbeton

Gerd MANTHEI¹, Jan HEINRICH¹, Frank SCHUBERT²

¹ THM Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

² Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden

Kontakt E-Mail: gerd.manthei@me.thm.de

Kurzfassung. Ein Forschungsprojekt an der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) befasst sich mit dem Ermüdungsverhalten vorgespannter Eisenbahnschwellen aus Stahlbeton. Zur Untersuchung der Rissausbreitung in der Bahnschwelle wurden vor und während eines dynamischen Dreipunktbiegeversuchs Schallemissions(SE)messungen durchgeführt. Die Wellenausbreitungsmessungen vor der Prüfung dienten zur Bestimmung des Lokalisierungsfehlers von SE-Ereignissen und zur Ermittlung der Geschwindigkeiten der elastischen Wellen. In dieser Arbeit wurden Messungen mit künstlichen SE-Quellen durchgeführt, um simulierte und gemessene SE-Signale im Frequenzbereich bis 250 kHz zu vergleichen. Für die Simulation wird der frei verfügbare Solver Numerical AE3D des Fraunhofer Instituts IKTS in Dresden verwendet. Dieses Simulationsprogramm basiert auf der Elastodynamic Finite Integration Technique (EFIT) und ermöglicht die numerische Berechnung der Wellenausbreitung von SE-Signalen für ein linear elastisches, lokal isotropes und heterogenes Medium. Durch den Einsatz von EFIT ist es möglich, die Ausbreitung von elastischen Wellen so im Zeitbereich zu simulieren, wie es in Experimenten der Fall ist. Die Ergebnisse können somit zum Vergleich und zur Interpretation von gemessenen Daten verwendet werden. Dieser Vergleich soll dazu beitragen, die Ergebnisse des THM-Forschungsprojekts weiter zu analysieren und die Lokalisierung von AE-Ereignissen für zukünftige Messungen zu verbessern.

1 Einleitung

Bahnschwellen müssen während ihrer Lebensdauer Achslasten von 25 t und Geschwindigkeiten von bis zu 280 km/h standhalten. Das Material, welches sich beim Gleisschwellenbau durchgesetzt hat, ist Beton. Heutzutage sind von den rund 80.000.000 verbauten Schwellen ca. 62.000.000 Schwellen aus Beton. Etwa 1.400.000 dieser Betonschwellen sind fehlerhaft [1]. Die Betonschwellen werden üblicherweise im Verbund mit Spannstahl hergestellt. Solche fehlerhaften Betonschwellen können laut der Süddeutschen Zeitung vom 19.8.2022 schuld am Zugunglück bei Garmisch-Partenkirchen gewesen sein. Erste vorläufige Erkenntnisse aus technischen Gutachten legen den Verdacht nahe, dass ein Herstellungsfehler vorliegt. Die Schwellen im betroffenen Streckenabschnitt weisen teilweise Unregelmäßigkeiten in der Materialbeschaffenheit auf. Kenner sprechen vom sogenannten "Betonkrebs". Bei der Mehrheit der fehlerhaften Spannbetonschwellen ist eine Rissbildung entlang der Spannglieder zu beobachten, durch die Wasser in die Schwellen eindringen und zu Schäden führen kann.



Da Stahlbeton ein sehr heterogener Werkstoff ist, führen Zuschläge und Bewehrungsstäbe zu einer starken Streuung von elastischen Wellen und damit zu einer beträchtlichen Abschwächung der Signalamplituden. In dieser Arbeit wird in numerischen Simulationen untersucht, wie die Wellenausbreitung durch Spannglieder gestört wird. Es kommt zu einer Dämpfung der Amplituden und zu Änderungen der Laufzeiten, die wiederum Einfluss auf die Ortungsgenauigkeit von SE-Quellen haben können. Zur Validierung der numerischen Simulation wurden auch Schallausbreitungsmessungen vorgenommen. Dazu wurden Testmessungen mit künstlich erzeugten Signalen (Bleistiftminenbruch, Sendesignale) an der Oberfläche der 2,4 m langen Spannbetonschwelle durchgeführt. Das Ziel ist es, die Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen aus der Messung zu vergleichen. Dieser Vergleich soll dazu beitragen, die Ergebnisse des Forschungsprojekts der THM weiter zu analysieren und die Ortung von SE-Ereignissen für zukünftige Messungen weiter zu verbessern [2].

2 Messung der Schallausbreitung

2.1 Versuchsaufbau

Die Schallausbreitungsmessungen wurden an einer vorgespannten Betonschwelle für Weichen durchgeführt. Diese Schwelle wurde vom Hersteller der THM zur Prüfung zur Verfügung gestellt. Die Betonschwelle besitzt eine Länge von 2400 mm und eine Höhe von 240 mm. Die Oberseite weist eine Breite von 240 mm auf und die Unterseite von 300 mm (Abb. 1, rechts). In der Schwelle befinden sich 12 durchgehende Bewehrungsstäbe aus Bau Stahl mit einem Durchmesser von 8 mm (Kreise in Abb. 1, rechts unten). Das Foto links in Abb. 1 zeigt die in die Prüfmaschine eingebaute Betonschwelle mit Orientierung des lokalen Koordinatensystems. An der Stirnseite im unteren Bereich des Fotos sind die Enden der 12 Spannglieder gut zu erkennen [3–5].

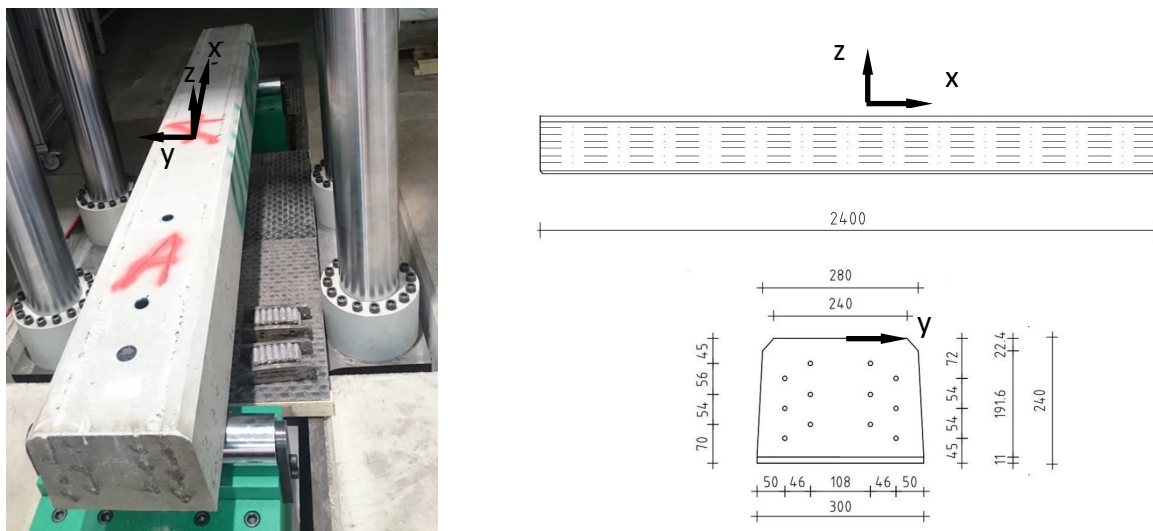


Abb. 1. Foto der Spannbetonschwelle vor dem Versuch mit Ursprung des lokalen Koordinatensystems (links), Seitenansicht (oben rechts) und Sicht auf die Stirnseite (unten rechts) der Schwelle mit Positionen der Spannglieder (Kreise) und den Hauptabmessungen in mm.

Auf der Oberfläche der Spannbetonschwelle wurden mit Hilfe von Blechen und Schrauben 16 SE-Sensoren und vier Ultraschallsender montiert. Die verwendeten SE-Sensoren von der Fa. GMuG mit der Typenbezeichnung MA-B1s 30–200 wurden speziell für SE-Messungen in Beton entwickelt und weisen einen breitbandigen Frequenzgang bis 200 kHz auf. Zur Ver-

besserung der akustischen Leitfähigkeit wurde zwischen Oberfläche und Sensor ein hochzähes Vakuummfett aufgetragen. Die SE-Sensoren wurden an Vorverstärker (40 dB Verstärkung) und Spannungsversorgung angeschlossen. Abb. 2 zeigt die Draufsicht der Spannbetonschwelle mit den montierten SE-Sensoren mit Vorverstärkern (blaue Kästchen). Die vier Ultraschallsender sind seitlich am Probekörper angebracht.

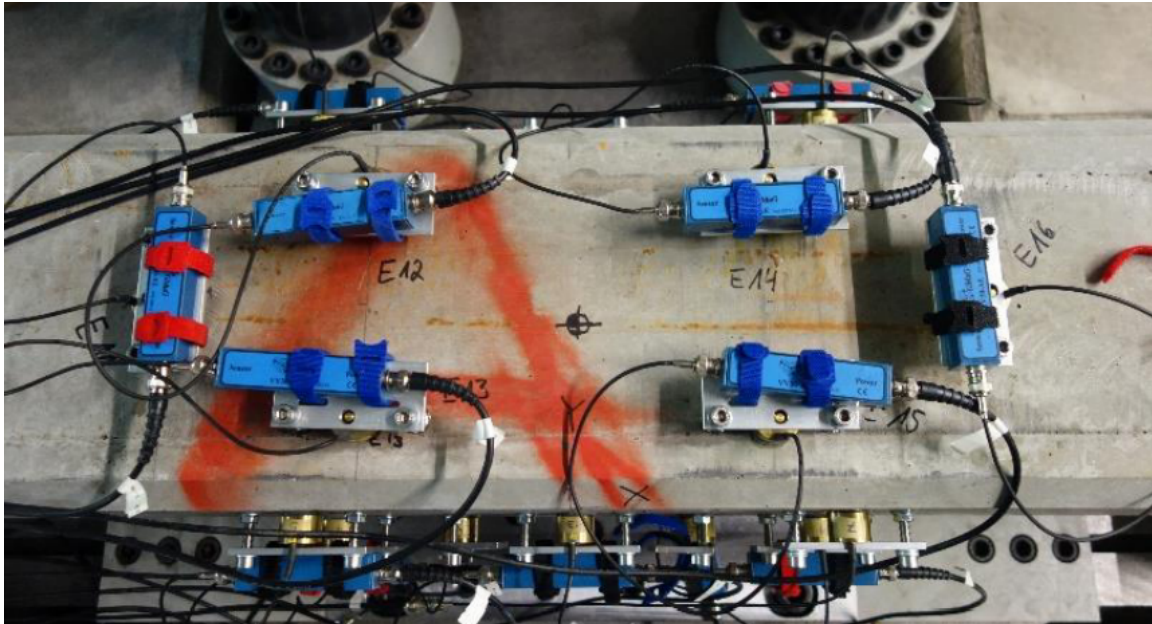


Abb. 2. Foto von den SE-Empfängern mit Vorverstärker (blau) auf der Oberseite des Probekörpers. Das schwarze Kreuz in der Mitte der des Probekörpers deutet die Position des Ursprungs des Koordinatensystems an.

Für die Versuche wurde der Ursprung des Koordinatensystems mittig auf die Oberseite der Betonschwelle gelegt. Der Ursprung ist in Abb. 2 mit einem schwarzen Kreuz markiert.

In Abb. 3 ist eine perspektivische Darstellung des mittleren Teils der Schwelle mit allen relevanten Positionen abgebildet. Der Ausschnitt der Schwelle beschränkt sich auf die Länge in x-Richtung von -300 mm bis $+300$ mm.

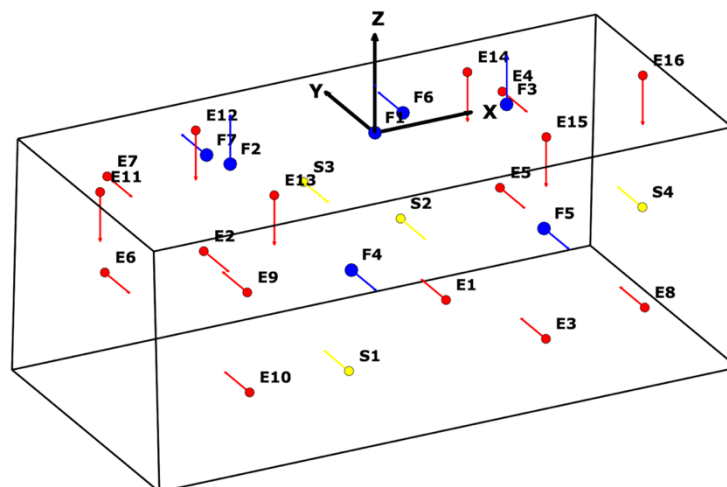


Abb. 3. Positionen von SE-Empfängern (E, rot), Sendern (S, gelb) und Bleistiftminenbrüchen (F, blau) in der Mitte (± 300 mm) der Bahnschwelle.

Die Empfänger und Sender befinden sich entweder an den beiden Seiten oder der Oberseite der Schwelle. Die Unterseite ist aufgrund der unzureichenden Zugänglichkeit nicht mit Sensoren bestückt. Die Positionen der SE-Empfänger sind durch die rot gefärbten Punkte E1 bis E16 markiert. An jedem dieser Punkte ist ein roter Pfeil, der die Richtungsempfindlichkeit des jeweiligen Empfängers angibt. Die Darstellung der Ultraschallsender S1 bis S4 erfolgte durch gelbe Punkte. Der Ort, an dem die Bleistiftminenbrüche durchgeführt wurden, ist durch die blauen Punkte F1 bis F7 gekennzeichnet. Die gelben Pfeile an den Positionen der Ultraschallsender sowie die blauen Pfeile an den Orten der Bleistiftminenbrüche geben jeweils die Richtung der Kraft, durch die die elastischen Wellen erzeugt wurden, an. Die Koordinaten der Ultraschallsender (S) und SE-Empfänger (E) sind Tabelle 1 eingetragen. Des Weiteren sind in dieser Tabelle die Positionen der Bleistiftminenbrüche (F), die zur Bestimmung des wahren Ortungsfehlers durchgeführt wurden, angegeben.

Tabelle 1: Koordinaten der SE-Empfänger (E), Sender(S) und Bleistiftminenbrüche (F).

Typ	Nr.	x-Koordinate [mm]	y-Koordinate [mm]	z-Koordinate [mm]
E	1	0	-145	-110
E	2	-102	147,7	-160
E	3	102	-147,7	-170
E	4	205	142,7	-60
E	5	205	147,3	-160
E	6	-205	147,3	-160
E	7	-205	142,7	-60
E	8	205	-147,3	-160
E	9	-205	-142,7	-60
E	10	-205	-147,3	-160
E	11	-285	0	0
E	12	-145	80	0
E	13	-145	-80	0
E	14	137	80	0
E	15	137	-80	0
E	16	278	0	0
S	1	-102	-147,7	-160
S	2	102	147,7	-170
S	3	0	145	-110
S	4	205	-142,5	-60
F	1	0	0	0
F	2	-150	0	0
F	3	137	0	0
F	4	-97	-142,7	-60
F	5	103	-142,7	-60
F	6	102	142,7	-60
F	7	-102	142,7	-60

2.2 Eingesetzte Messtechnik

Für die Durchschallungsmessungen wurde eine 16-Kanalgerät der Fa. GMuG eingesetzt. Die gemessenen Signale werden von dem Messsystem mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz und einer Amplitudenauflösung von 16 Bit digitalisiert. Es folgt eine Verstärkung um 40 dB (Faktor 100). Die untere Grenzfrequenz wurde durch einen Hochpassfilter auf 20 kHz eingestellt. Ein Tiefpassfilter beschränkt die obere Grenzfrequenz auf 200 kHz. Das Messsystem

umfasst sowohl Signalgenerator- als auch Transientenrekorderkarten in einem Personal Computer. Während einer einzigen Messung wurden für jede Kombination von Sender- und Empfängerposition acht Signale unterschiedlicher Form seriell durch den Probekörper übertragen. Die Form der Signale wurde mit einem Computerprogramm berechnet. Es wurde eine Breitbandsignalfunktion mit einer Anstiegszeit von $1 \mu\text{s}$ und sieben Signale mit Frequenzen zwischen 20 und 200 kHz verwendet. Die Halbwertsbreite dieser Signale beträgt 50 Prozent der Mittenfrequenz des Leistungsspektrums. Abb. 4 zeigt die Form des schmalbandigen (oben) und breitbandigen (unten) elektrischen Sendesignals. Eine Generatorkarte wandelt die Signale in analoge Signale um. Das Ausgangssignal der Generatorkarten dient als Triggerimpuls für die Transientenrekorderkarte.

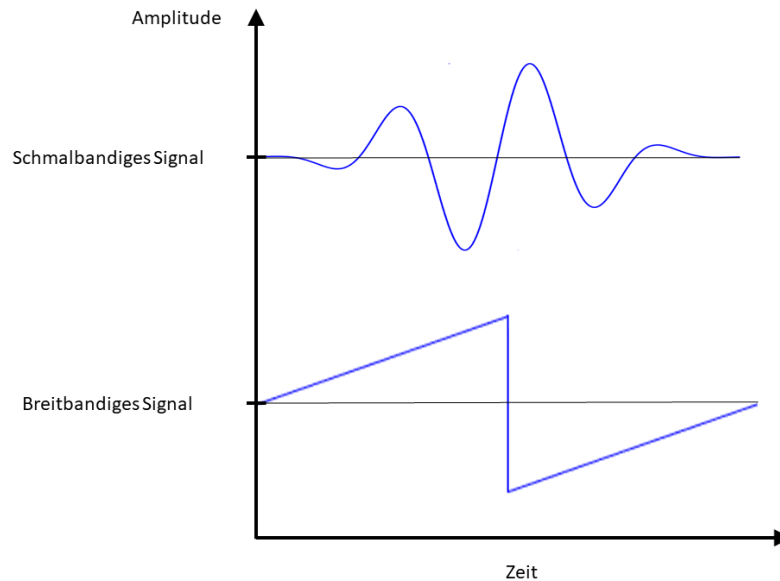


Abb. 4. Elektrische Signalform des schmalbandigen (oben) und breitbandigen (unten) Sendesignals.

2.3 Versuchsdurchführung

Die Durchschallungsmessungen wurden zu Beginn des Drei-Punkt-Biegeversuchs durchgeführt. Zur Verbesserung der Signalgüte wurden bei jeder Messung bis zu 256 Stapelungen (d.h. Wiederholungen mit Aufsummation) durchgeführt. Da bei einer Stapelung die Signalamplitude proportional zu deren Anzahl zunimmt, die Amplitude inkohärenter Störsignale aber nur mit der Wurzel aus der Anzahl ansteigt, wird das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störuntergrund in diesem Fall auf das 16-fache angehoben. Zusätzlich wurden durch Bleistiftminenbrüche schmalbandige Signale erzeugt. Die Bleistiftminenbrüche wurden an sieben verschiedenen Positionen durchgeführt. Um Variationen der erzeugten Signale auszuschließen, wurde der Vorgang des Bleistiftminenbruchs an derselben Position mehrfach wiederholt.

3 Simulation der Schallausbreitung

3.1 Aufbau des Modells

Das Programm Numerical AE3D besteht aus der Textdatei Input100 zur Eingabe der Parameter des zu berechnenden Modells sowie einer Windows-Executable zur Ausführung der dreidimensionalen numerischen Simulation. In der Textdatei können neben dem Modellaufbau auch verschiedene Einstellungen, welche einen Einfluss auf die numerische Berechnung

und auf die Ergebnisse haben, vorgenommen werden [6,7]. Für den Modellaufbau sind Geometrie und Materialeigenschaften des Grundkörpers, die Streueigenschaften und die Position und Richtung der Sensoren relevant. Weiterhin können punktförmige Volumen- und Oberflächenquellen definiert werden.

In Abb. 5 ist der Grundkörper des Modells in einer perspektivischen Ansicht mit Blickrichtung schräg von oben zu sehen. Es sind die Modellgrenzen sowie die Positionen der SE-Sensoren und der Verlauf der zylinderförmigen Spannglieder aus Stahl sichtbar. Um den Rechenaufwand zu verringern, wird nur der zentrale Bereich der Schwelle von ± 300 mm (Länge 600 mm) mit einer Laufzeit der Signale bis zu $400 \mu\text{s}$ modelliert. Der Querschnitt der Schwelle beträgt $300 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$. Da die verwendete Programmversion nur rechteckige Außenabmessungen zulässt, kann der konische Verlauf der Schwelle nicht berücksichtigt werden (vgl. Abb. 3). Die Positionen der Empfänger, Sender und Bleistiftminenbrüche wurden dementsprechend angepasst. Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten im Beton betragen 4.850 m/s und 2.900 m/s für die L- bzw. T-Welle. Für die Spannglieder wurden Werte von 5.900 m/s und 3.200 m/s eingesetzt. Die Dichte für Beton und Stahl beträgt 2.100 kg/m^3 bzw. 7.800 kg/m^3 . Die Zuschläge im Beton konnten nicht modelliert werden, da die Korngrößenverteilung nicht bekannt ist. Zu beachten ist, dass der Koordinatenursprung der Simulation in der unteren Ecke auf der linken Seite liegt und damit nicht mit der Messung übereinstimmt.

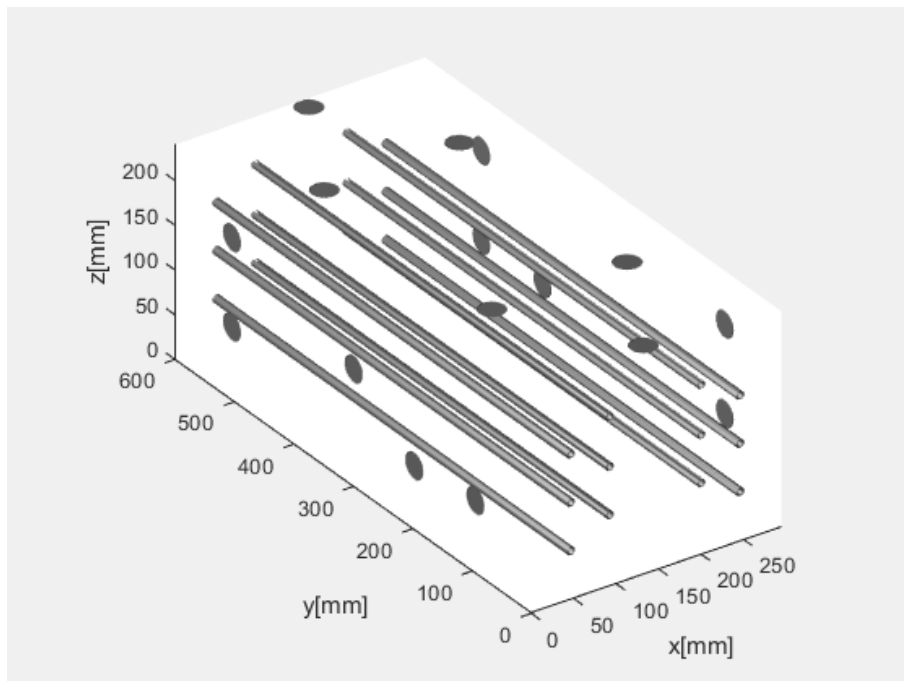


Abb. 5. Perspektivische Darstellung des dreidimensionalen Modells zur Simulation der Schallausbreitung mit den Modellgrenzen in x-, y- und z-Richtung sowie den Positionen der SE-Sensoren (Ovale) und den kreisförmigen Bewehrungsstäbe aus Stahl (Linien). Die Blickrichtung ist von schräg oben.

3.2 Durchführung der Simulation

Die Simulation der Schallausbreitung wurde mit einem schmalbandigen akustischen Anregungssignal (Abb. 6, oben) mit einer Mittenfrequenz von 100 kHz und einem breitbandigen Anregungssignal (Abb. 6, unten) mit einer oberen Grenzfrequenz von 142 kHz durchgeführt. Die Frequenzen wurden so gewählt, dass ein direkter Vergleich mit den Messungen möglich ist. Allerdings enthält das schmalbandige Signal im Vergleich mit den Messungen eine Halbschwingung mehr, was zu einer möglichen Abweichung der Ergebnisse führen kann. Der

Bleistiftminenbruch wurde mit einer punktförmigen Normalkraft auf der Oberfläche des Grundkörpers angenommen.

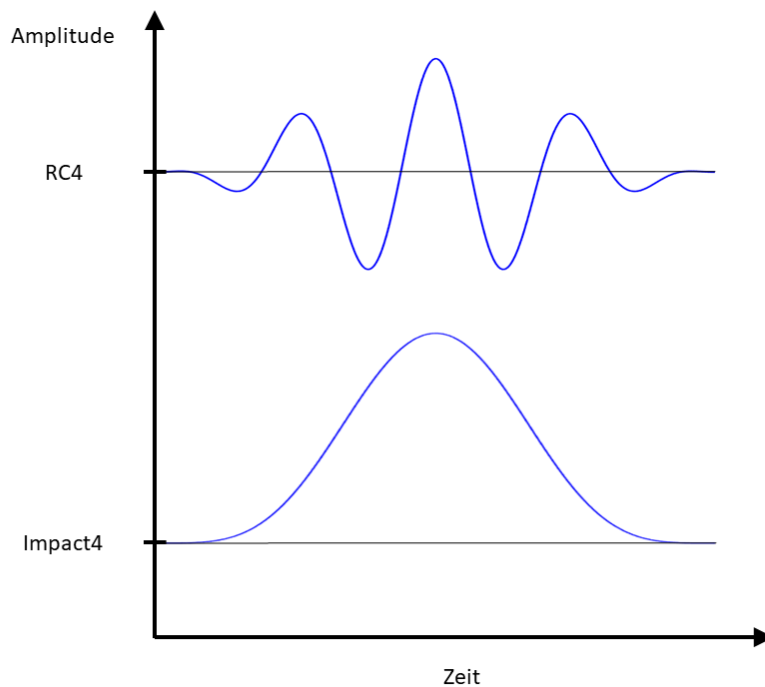


Abb. 6. Signalformen des schmalbandigen (RC4) und breitbandigen (Impact4) Anregungssignals zur Simulation der Schallausbreitung.

4 Vergleich zwischen Messung und Simulation

Im Folgenden werden die Wellenformen der Messungen mit den berechneten der Simulation verglichen. Dazu wurden die Signale eines Bleistiftminenbruchs an Position F6 und jeweils ein breitbandiges und schmalbandiges Sendesignal an Position S3 ausgewählt. In den Abbildungen 7 bis 9 sind im unteren Teilbild die auf das jeweilige Maximum der Signalspur normierten Signale der Messung (blau) und der Simulation (rot) von allen 16 Empfängern übereinander zu sehen. Am Ende der Spur ist jeweils die Entfernung zwischen Sender und Empfänger in Millimeter sowie der Einfallswinkel zwischen Normalenvektor des Sensors und Radiusvektor der elastischen Wellen angegeben. Die gestrichelten vertikalen Linien geben die berechneten Einsatzzeiten der Longitudinalwelle (L1) und der der Transversalwelle (T1) an. Zur Bewertung der Übereinstimmung von Simulation und Messung wurden die Signale der direkten L- und T-Welle herangezogen. Die Länge des Zeitfensters der Signale wurde anhand der dominierten Frequenz abgeschätzt. Demnach beträgt die Dauer der L-Welle beim Bleistiftminenbruch $17 \mu\text{s}$ und bei der Durchschallung mit dem schmalbandigen und breitbandigen Sendesignal $15 \mu\text{s}$ bzw. $30 \mu\text{s}$. Die Dauer der T-Welle ist etwa um das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten ($c_L/c_T = 1,67$) größer. Die Signalanteile des Zeitfensters sind mit einer dicken Linie dargestellt. Im oberen Teilbild ist oben links die Vorderansicht, oben rechts die Seitenansicht und unten rechts die Draufsicht des Modells aus Abb. 3 dargestellt. Der Laufweg zwischen Schallquelle und Empfänger ist durch eine gestrichelte Linie angegeben.

Die Abbildungen zeigen das an den meisten Kanälen die gemessenen und berechneten Einsatzzeitpunkte der L- und T-Welle gut übereinstimmen; an einigen Kanälen sogar auch die Signalform (z.B. an Kanal 6 in Abb. 7 oder Kanal 5 und 6 in Abb. 7). Jedoch gibt es auch Signale, an denen die Einsatzzeitpunkte der L-Wellen (z.B. in Abb. 7, Kanal 1 und 2) oder der T-Wellen zeitlich verzögert einsetzen (Abb. 8, Kanal 2).

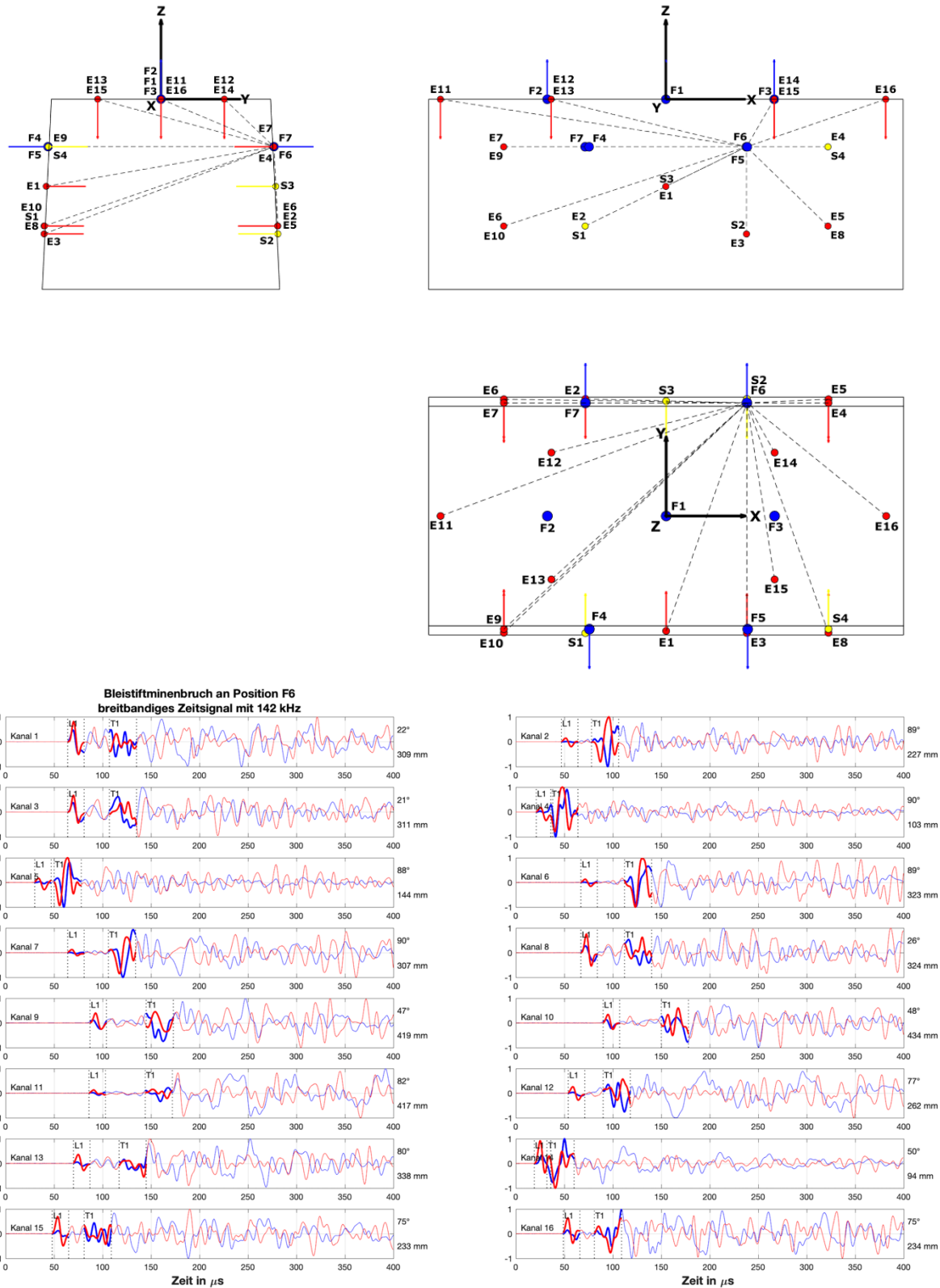


Abb. 7. Oben: Laufwege (gestrichelte Linie) zwischen der Position F6 des Bleistiftminenbruchs und den 16 Empfängern in drei Ansichten. Unten: Gemessene (blau) und berechnete (rot) Wellenformen mit den Einsatzzeiten der L- und T-Welle (L1 und T1). Die Signale der L- und T-Welle zwischen den vertikalen gestrichelten Linien sind durch eine dicke Linie hervorgehoben.

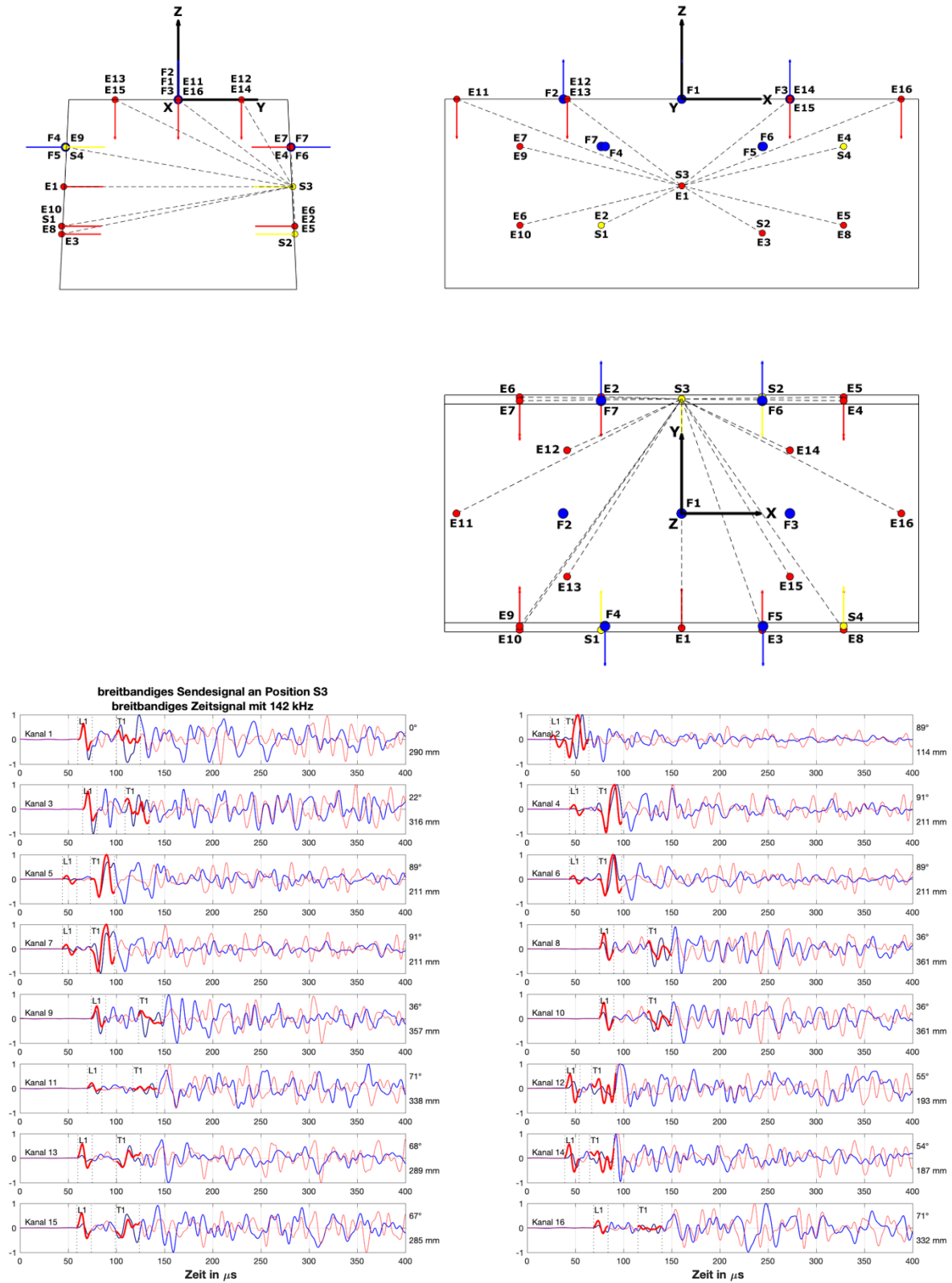


Abb. 8. Oben: Laufwege (gestrichelte Linie) zwischen der Position S3 des breitbandigen Sendesignals und den 16 Empfängern in drei Ansichten. Unten: Gemessene (blau) und berechnete (rot) Wellenformen mit den Einsatzzeiten der L- und T-Welle (L1 und T1). Die Signale der L- und T-Welle zwischen den vertikalen gestrichelten Linien sind durch eine dicke Linie hervorgehoben.

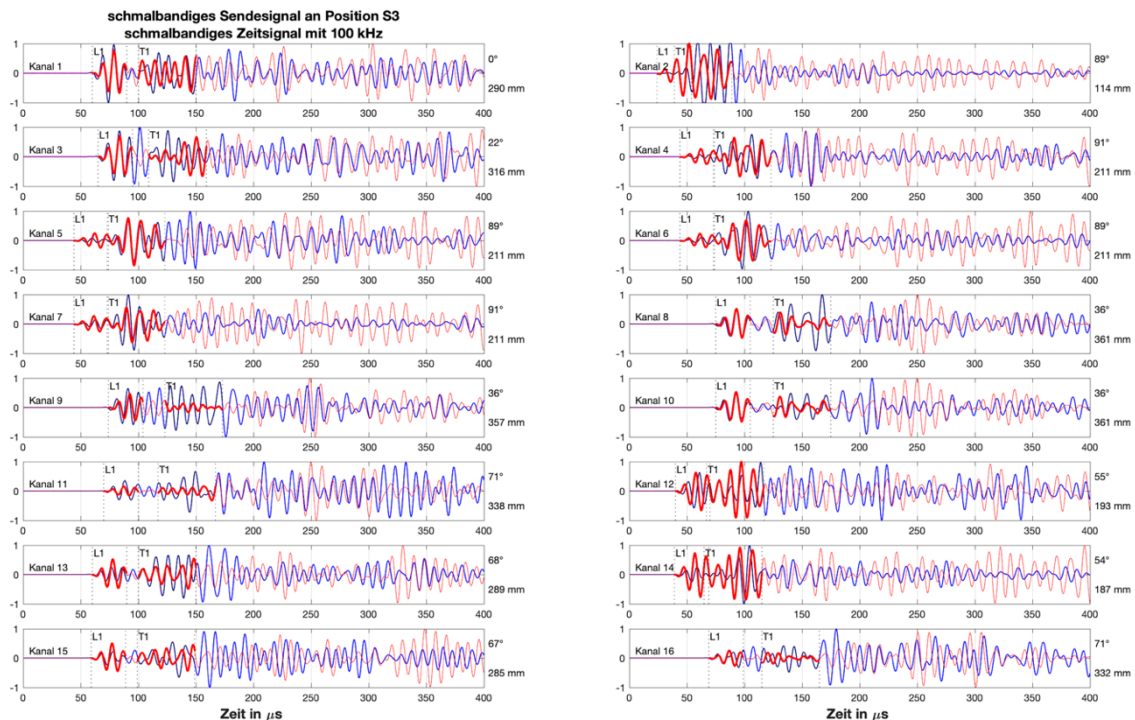


Abb. 9. Gemessene (blau) und berechnete (rot) Wellenformen des schmalbandigen Sendesignals mit 100 kHz mit den Einsatzzeiten der L- und T-Welle (L1 und T1). Die Signale der L- und T-Welle zwischen den vertikalen gestrichelten Linien sind durch eine dicke Linie hervorgehoben.

Bei der Auswertung von weiteren Messungen kann kein direkter Zusammenhang zwischen dem Laufweg oder Einfallswinkel und den Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Einsatzzeitpunkten der L- und T-Wellen festgestellt werden. Sowohl bei geringem Einfallswinkel als auch bei 90° treten an wenigen Signalen Unterschiede in den Einsatzzeitpunkten auf. Bei geringen Entfernungen zwischen Schallquelle und Empfänger treten die Unterschiede vermehrt auf. Von insgesamt 35 Signalen mit einer Entfernung kleiner als 150 mm zeigen nur acht Signale eine gute Übereinstimmung in den Einsatzzeitpunkten. Bei einigen Signalen ist eine Beurteilung aufgrund starker Unterschiede in der Amplitude schwierig. Eine eindeutige Phasenverschiebung ist bei 18 Signalen zu erkennen. Bei diesen Signalen tritt zum Teil eine Phasenverschiebung von bis zu ca. 180° (entspricht ca. $\lambda/2$) auf. Weiterhin wird festgestellt, dass Signale, die von derselben Sendeposition stammen, gleiche Wellenmuster aufweisen. Abweichungen in den Einsatzzeitpunkten treten sowohl bei breit- und schmalbandiger Anregung auf.

5 Einfluss der Spannglieder auf die Wellenausbreitung

Um den direkten Einfluss der Spannglieder auf die Wellenausbreitung zu untersuchen, ist in Abb. 10 das Simulationsergebnis des ganzen Wellenfeldes dargestellt. Gezeigt wird ein Querschnitt in der x-z-Ebene in der Mitte des Modelkörpers als Momentaufnahmen nach vier verschiedenen Zeitpunkten $t_1 = 30 \mu\text{s}$, $t_2 = 61 \mu\text{s}$, $t_3 = 80 \mu\text{s}$ und $t_4 = 102 \mu\text{s}$, wobei die Graustufen dem Betrag der Partikelgeschwindigkeit entsprechen. Die Quelle befindet sich an Position S3. Simuliert wird wieder eine punktförmige Normalkraft an der Oberfläche des Modellkörpers. Das Anregungssignal hat eine Grenzfrequenz von 142 kHz. Von der Quelle, die L- und T-Wellen abstrahlt, breiten sich die Wellen zunächst kugelförmig aus. Zum Zeitpunkt t_2 trifft die L-Welle auf die gegenüberliegende freie Oberfläche und wird reflektiert. Da sich die T-Welle im Medium langsamer ausbreitet als die L-Welle, nimmt der Abstand

zwischen den beiden reflektierten Wellentypen mit der Zeit zu. Aufgrund der vielen Reflexionen der L-Welle an der Oberfläche der Ober- und Unterseite ist das Eintreffen der T-Welle zum Zeitpunkt t_4 nicht mehr zu erkennen. Deutlich zu sehen ist in den vier Teilabbildungen, wie die Wellen in der näheren Umgebung der Spannglieder (Kreise) gestreut werden und etwas verzögert den Wellenfronten der einzelnen Phasen folgen. Da es sich bei den Spanngliedern nur um nahezu punktförmige Einzelstreuer handelt, wird dadurch keine weitreichende Störung des Wellenfeldes verursacht.

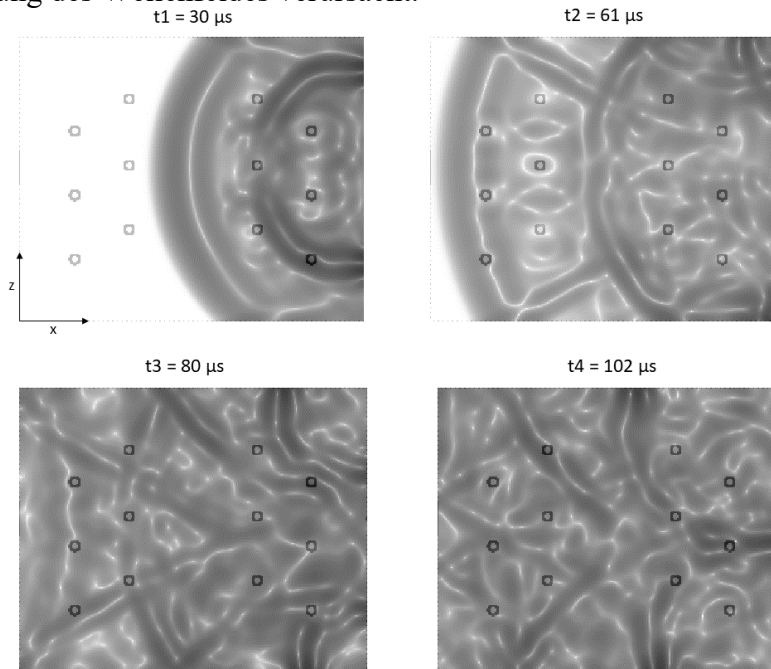


Abb. 10. Simulationsergebnis des ganzen Wellenfeldes in der x-z-Ebene in der Mitte des Modelkörpers als Momentaufnahmen nach vier verschiedenen Zeitpunkten $t_1 = 30 \mu\text{s}$, $t_2 = 61 \mu\text{s}$, $t_3 = 80 \mu\text{s}$ und $t_4 = 102 \mu\text{s}$.

Abb. 11 zeigt die berechneten Wellenformen mit (rot) und ohne Spannglieder (blau) eines breitbandigen Zeitsignal mit einer oberen Grenzfrequenz von 142 kHz an Position S3 (vgl. Abb. 8).

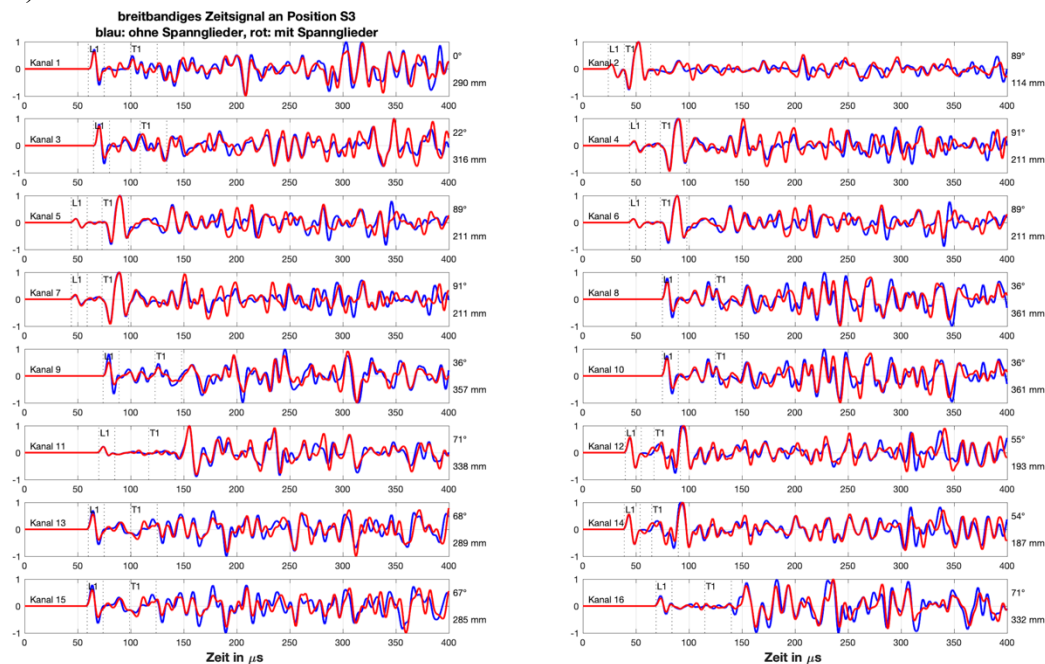


Abb. 11. Berechnete Wellenformen mit (rot) und ohne Spannglieder (blau) eines breitbandigen Zeitsignal mit einer oberen Grenzfrequenz von 142 kHz an Position S3.

Die Abbildung zeigt, dass der Einfluss der Spannglieder bei der direkten L- und T-Welle keinen Einfluss auf Amplitude und Phase hat. Lediglich bei den später eintreffenden Reflexionen an den Oberflächen sind geringe Abweichungen in der Amplitude zu erkennen.

6 Zusammenfassende Diskussion

Die in dieser Arbeit beschriebenen Betrachtungen zur Ausbreitung elastischer Wellen im Frequenzbereich bis ca. 200 kHz tragen zum Verständnis bei, wie die elastischen Wellen bei ihrer Ausbreitung durch das Prüfobjekt verändert werden und wie dies in den beobachteten Signalen zum Ausdruck kommt. Die Komplexität der Wellenausbreitung durch Streuung und Reflexionen an freien Oberflächen und inneren Grenzflächen macht die Interpretation der SE-Signale anspruchsvoll und nicht immer eindeutig. Bei Anwendungen der SEA in bewehrten Spannbeton muss dies zur Verbesserung der Ortungsgenauigkeit berücksichtigt werden.

Es gibt verschiedene Gründe, die als Ursache für die Abweichungen der Einsatzzeitpunkte zwischen Messungen und Simulation infrage kommen. Unter anderem sind Unterschiede zwischen den Signalen möglicherweise durch Einschränkungen bei der Modellerstellung erklärbar. Das Programm lässt nur ein quaderförmiges Modellgebiet zu. So konnte der konische Verlauf der Seitenflächen im Modell nicht berücksichtigt werden. Dadurch entsteht für einige Empfänger eine Abweichung von ca. 1 cm zur jeweiligen Schallquelle. Das entspricht etwa einer viertel Wellenlänge bei der L-Welle mit einer Mittenfrequenz von 142 kHz. Obwohl bei den durchgeführten Messungen breitbandige AE-Sensoren im Frequenzgebiet bis ca. 200 kHz eingesetzt wurden, muss das Übertragungsverhalten der realen AE-Sensoren berücksichtigt werden, um wirklich quantitative Vergleiche zwischen berechneten und gemessenen Zeitsignalen anstellen zu können. Entscheidend ist, dass der akustische Impuls, der vom realen Wandler ins Bauteil abgestrahlt wird, bekannt ist und auch im Modell verwendet wird. Daher macht es bei dem hier realisierten Modell lediglich Sinn, die Ersteinsatzzeitpunkte von L- und T-Welle zu betrachten, denn diese sind nur von den Ausbreitungsgeschwindigkeiten und der Dichte abhängig und weitgehend unabhängig von der Signalform.

Ganz generell muss auch beachtet werden, dass aufgrund der Streuung an den vielen Körnern und Poren im realen Beton eine gewisse Dämpfung und auch Phasenverschiebung der Wellen einhergeht, die im vorliegenden Modell nicht integriert ist. Somit dürften vor allem die Amplituden zu späteren Zeitpunkten bzw. bei größeren Laufwegen im Modell größer sein als bei den Messungen. Es empfiehlt sich daher den homogenen Modellbeton durch eine realistische Sieblinie mit Zuschlagstoffen verschiedener Größe und Form plus makroskopischer Poren zu ersetzen, wie es in der Vergangenheit bereits demonstriert wurde [6]. Damit ist es auch möglich, den Einfluss von lokalen Poren und Körnern im Nahfeld der Quelle systematisch zu untersuchen. Wenn z.B. ein Bleistiftminenbruch in unmittelbarer Nähe einer solchen Pore liegt, wird das Quellereignis merklich verändert [6].

Referenzen

- [1] Hentschel, V., Fahrwegstrategie der DB Netz AG - Anlagenverfügbarkeit im Lebenszyklus, 2017.
- [2] Manthei, G., Walther, M., Koob, M., Minnert, J., Blatt, M., Schallemissionsprüfung an großmaßstäblichen Laborproben aus Beton, ZfP-Zeitung 174, April 2021, S. 34–41.
- [3] Walther, M., Manthei, G., Koob, M., Minnert, J., Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Spannbetonschwellen unter statischer und dynamischer Belastung, 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen, Karlsruhe, Berichtsband der DGZfP, 2019.
- [4] Manthei, G., Walther, M., Minnert, J., Investigation of Crack Formation During Long-Term Acoustic Emission Measurements on a Reinforced Concrete Railroad Switch Sleeper in the Context of Structural Health Monitoring. In: P. Rizzo and A. Milazzo (Eds.): EWSHM 2022, LNCE 253, Springer Nature Switzerland, 2022, S. 609–618, https://doi.org/10.1007/978-3-031-07254-3_61.

- [5] Manthei, G., Walther, M., Minnert, J., Untersuchung der Rissbildung in Gleis- und Weichenschwellen aus vorgespanntem Stahlbeton mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, 11. Fachtagung ZfP im Eisenbahnwesen, 10.-12. März, Erfurt, Berichtsband der DGZfP, 2020.
- [6] Schubert, F., Köhler, B., Ten Lectures on Impact-Echo, Journal of Nondestructive Evaluation, 27, 5–21, 2008, <https://doi.org/10.1007/s10921-008-0036-2>.
- [7] Schubert, F., Numerical AE3D – Ein freies Simulationstool zur Berechnung und Visualisierung von Schallemissionsproblemen, 21. Kolloquium Schallemission, Fulda, Berichtsband 159 der DGZfP, 2017.