

# Simulation der Schallausbreitung in Eisenbahnschienen mit FEM und SAM

Yannick WACK<sup>1</sup>, Thomas HECKEL<sup>1</sup>, Rainer BOEHM<sup>1</sup>, Daniel BRACKROCK<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt E-Mail: yannick.wack@bam.de

**Kurzfassung.** Die Simulation von Ultraschallausbreitung ist ein wesentliches Hilfsmittel zur Optimierung von Prüfanordnungen und wird zunehmend in der Prüfvorbereitung eingesetzt. Eisenbahnschienen sind Bauteile mit komplexer Geometrie und im eingebauten Zustand eingeschränkter Zugänglichkeit. Bei der Prüfung im Feld entstehen aus der Schienengeometrie komplexe Echosignale mit Formanzeigen, die schwer zu interpretieren sind.

Für das bessere Verständnis der Schallausbreitung in der Eisenbahnschiene wird diese in einem ersten Schritt mit Hilfe verschiedener Ansätze modelliert. Hierbei werden Finite Elemente Methoden und semi-analytischen Modelle verwendet. In einem zweiten Schritt werden die Ergebnisse der Simulationsmodelle einander gegenübergestellt und mit Messungen an realen Schienen verglichen.

Ziel dieser Untersuchungen ist die Validierung von Simulationsverfahren mit Hilfe von Messdatensätzen und Überprüfung der Anwendbarkeit bei der Bewertung von Ergebnissen der Schienenprüfung.

## Einführung

Steigende Belastungen des Schienennetzes durch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und hohe Geschwindigkeiten stellen die Schienenprüfung vor große Herausforderungen. Die steigende Zahl an Schienenfehler erfordert immer leistungsfähigere Schienenprüfverfahren. Die Verfahren der Ultraschallprüfung von Schienen werden daher ständig weiterentwickelt und automatisiert. Um die Nachweisbarkeit von Schienenfehlern durch automatisierte Prüfverfahren einschätzen und optimieren zu können werden die Echosignale bekannter Schienenfehler durch das Prüfsystem ausgewertet. Da sich Schienenfehler nur begrenzt bewusst in Schienen einbringen lassen ist die Validierung der Nachweisbarkeit aufwendig und teuer.

Ziel dieser Arbeit ist es daher die Ultraschallausbreitung in einer Schiene mit Schienenfehlern zu modellieren und das resultierende Echosignal zu simulieren. Dazu werden semianalytische Methoden (SAM) und Finite Elemente Methoden (FEM) verwendet und mit realen Messdaten verglichen.

## 1. Modellierung und Versuchsaufbau

Die Ultraschallausbreitung in der Schiene wurde mit den Annahmen der linear elastischen Strukturmechanik in dem kommerziellen FEM Programm „ANSYS Mechanical“ modelliert. Durch die Annahme eines ebenen Dehnungszustandes wird das Modell auf 2 Dimensionen reduziert. Um die Bewegungsgleichungen lösen zu können wird die Struktur zeitlich und örtlich diskretisiert. Die zeitliche und örtliche Auflösung wird entsprechend Ref. [1] so gewählt, dass die Frequenz und die kleinste Wellenlänge ausreichend genau aufgelöst werden. Die Schiene besteht aus Stahl und wird mit den Materialeigenschaften in Tabelle 1 beschrieben.

**Tabelle 1.** Modelleigenschaften

Materialeigenschaften		Dichte	Emodul	Poissonzahl
Schallgeschwindigkeit <sup>1</sup>				
$c_l = 5936 \text{ m/s}$	$ct = 3043 \text{ m/s}$	$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$	$E = 21 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$	$\mu = 0.3$
Prüffrequenz		Prüfkopfdurchmesser		
2 Mhz (Fall 1) bzw. 4 Mhz (Fall 2)		25,4 mm		

Durch die hohe Prüffrequenz (vgl. Tabelle 1) muss die Struktur sehr fein aufgelöst werden und das Modell wird sehr groß. Um die Rechenzeit zu verkürzen wird daher ein explizites Zeitintegrationsverfahren verwendet. Der für das explizite Integrationsverfahren notwendige kleine Zeitschritt ist durch die feine zeitliche Auflösung der Struktur bereits gegeben. Dämpfung wird in der Berechnung nicht berücksichtigt. Der Schalleintritt wird durch eine transiente Druckrandbedingung realisiert. Das Echo wird an dieser Randbedingung als Beschleunigungskomponente normal zur Oberfläche ausgewertet. Dazu wird die Beschleunigungskomponente zu jedem Zeitschritt über die Fläche des Schwingers integriert. Für den Vergleich wird die Schiene außerdem in dem Programm „CIVA“ modelliert. CIVA nutzt ein semianalytisches „pencil propagation“ Model [2]. Es überträgt die Gesetzmäßigkeiten der elektrodynamischen Wellentheorie auf elastodynamische Wellen. Es werden die selben Modelleigenschaften wie in der FEM Modellierung verwendet (vgl. Tabelle 1)

Für die Validierung werden zusätzlich mechanisierte Messungen an einer Testschiene vom Typ UIC - 60 durchgeführt. Der Messaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abb. 1.** Messaufbau zur Validierung der Berechnungsergebnisse an einer UIC – 60 Testschiene

<sup>1</sup> Im FEM Modell aus dem Rückwandecho berechnet

## 2. Fall 1: Formanzeigen bei der Senkrechteinschallung in Abhängigkeit vom Prüfkopfversatz

Um die Aussagekraft der verschiedenen Berechnungsmethoden für die Ultraschallprüfung bewerten zu können werden zunächst zwei Anwendungsbeispiele berechnet und mit Messungen an einer Testschiene verglichen.

Das erste Beispiel befasst sich mit typischen Formechos die bei der Senkrechteinschallung in die Schiene entstehen. Diese entstehen durch Reflexion der Wellenfront im Schienenhals (vgl. Abbildung 3). Eine alternierende Transversalwelle im Schienenhals sendet in regelmäßigen Abständen Longitudinalwellen in Richtung des Prüfkopfes. Um diese Formechos in Abhängigkeit vom Versatz des Prüfkopfes untersuchen zu können wird ein Versuchsmodell wie in Abbildung 2 aufgebaut.

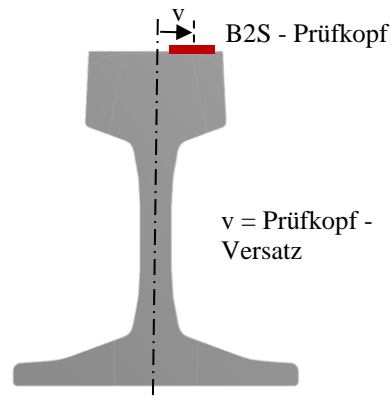


Abb. 2. Modell zur Bestimmung der Formanzeigen an einer UIC – 60 Schiene

Dazu wird ein Senkrechtprüfkopf mit einem Durchmesser von 25,4 mm und einer Prüffrequenz von 2 Mhz von der Mitte der Schiene in 1 mm Schritten zum Rand der Schiene bewegt. Dieses Szenario wird sowohl mit der FEM und der SAM berechnet als auch an der Testschiene gemessen. Die mit der FEM berechnete Schallausbreitung ist in Abbildung 3 dargestellt.

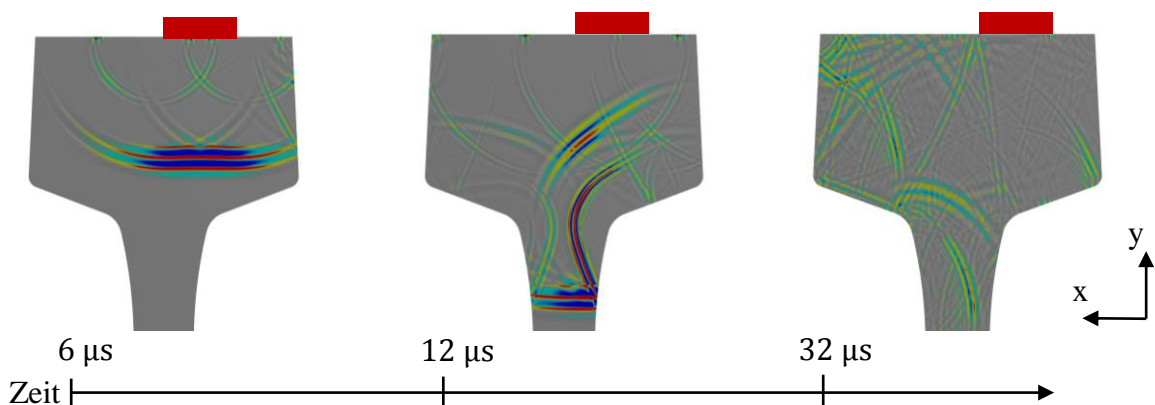
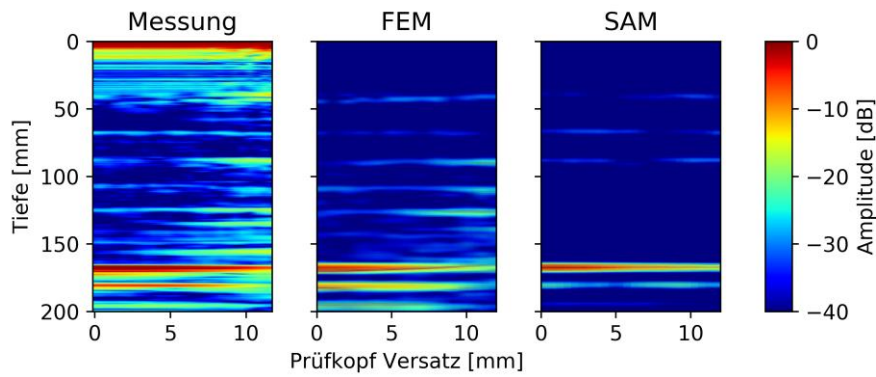


Abb. 3. FEM Simulation der Wellenausbreitung im Schienenkopf für verschiedene Schalllaufzeitpunkte.  
Farbdarstellung: Feld der Beschleunigungskomponente in  $y$  Richtung.

Die Möglichkeit der Visualisierung der Schallausbreitung im Schienenkopf kann dazu genutzt werden unbekannt Echosignale zu identifizieren.

Aus den berechneten A-Bildern der unterschiedlich versetzten Prüfköpfe wird anschließend ein B-Bild erstellt. Die Ergebnisse sind im Vergleich zu dem gemessenen B-Bild in Abbildung 4 dargestellt.

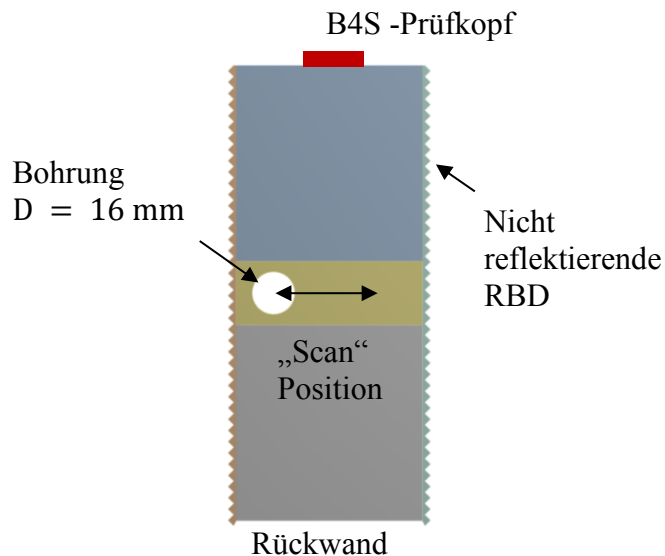


**Abb. 4.** Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Formanzeigen in Abhängigkeit des Prüfkopfversatzes in B-Bild Darstellung

Es ist zu erkennen, dass sowohl FEM als auch SAM das Rückwandecho im Vergleich zur Messung korrekt darstellt. Im B-Bild der SAM Berechnung wird jedoch das erste und zweite Mehrfachecho der Rückwand mit einer zu geringen Amplitude dargestellt. Die Formechos, im B-Bild zu erkennen als regelmäßige horizontale Streifen, werden in der FEM Berechnung in der richtigen Tiefe und Amplitude angezeigt. Die SAM Berechnung stellt nur die ersten drei Formechos korrekt dar. Der Grund für das Fehlen dieser Echos konnte im Zuge dieser Arbeit noch nicht identifiziert werden.

### 3. Fall 2: Abbildung einer Querbohrung in der Schiene

Als weiteres Beispiel wird eine Befestigungsbohrung in der Schiene untersucht. Diese hat einen Durchmesser von 16 mm und ist in einer Tiefe von 86 mm im Schienenhals angebracht. Die Bohrung wird mit einem Senkrechtprüfkopf mit dem Durchmesser 25,4 mm und der Prüffrequenz 4 Mhz untersucht. In Abbildung 5 ist die FEM Modellierung dieses Falles dargestellt.

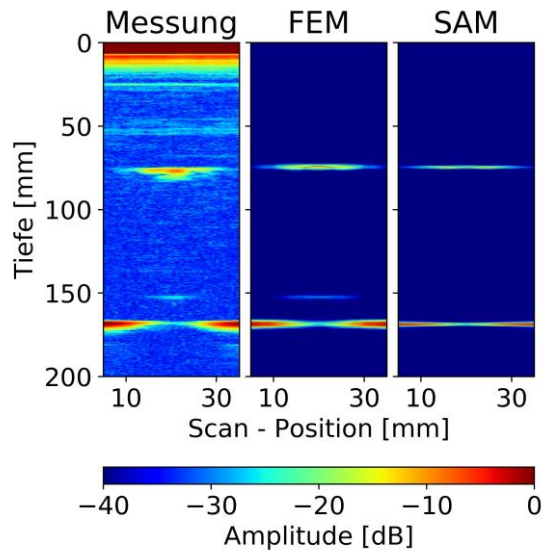


**Abb. 5.** FEM Modell des Scans einer Befestigungsbohrung mit einem 4 Mhz Prüfkopf

Um die Modellgröße zu begrenzen wird das Schienenprofil vernachlässigt und die Schiene als Rechteck mit einem ebenen Dehnungszustand angenähert.

Außerdem werden am linken und rechten Rand nicht reflektierende Randbedingungen (RBD) gesetzt. Weiterhin wird anstatt den Prüfkopf über die Schiene zu bewegen der Fehler

im Material verschoben. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Berechnungen und Messungen analog zu Fall 1 als B-Bilder gegenübergestellt.



**Abb. 6.** Gegenüberstellung gemessener und simulierter B-Bilder einer Befestigungsbohrung

Es ist zu erkennen, dass die FEM Berechnung die beiden Echos der Querbohrung korrekt darstellt und auch die Abnahme des Rückwandechos korrekt dargestellt ist. Die Berechnung mit SAM stellt das erste Echo der Querbohrung sowie die Abnahme des Rückwandechos korrekt da. Das zweite Echo der Querbohrung wird jedoch nicht berechnet. Ein Grund für das Fehlen dieses Echos konnte im Zuge dieser Arbeit nicht identifiziert werden.

#### 4. Fazit

Zusammenfassend bildet die Finite Elemente Methode sowohl die Formechos (Fall 1) als auch die Befestigungsbohrung (Fall 2) vollständig ab. Die Echos werden in Laufzeit und Amplitude korrekt berechnet. Die FEM benötigt jedoch aufgrund der hohen Prüffrequenzen von 2 bis 4 Mhz einen hohen Modellierungs- und Berechnungsaufwand. Wegen der Größe der Schiene im Verhältnis zur Wellenlänge ist die Modellierung auf dem verwendeten Personal Computer derzeit nur in 2D möglich.

Mit den verwendeten seminanalytischen Methoden werden Standardfehler wie die Befestigungsbohrung ausreichend genau dargestellt. Echos aus komplexeren Geometrien wie die Formechos aus Fall 1 sind nur eingeschränkt berechenbar. Der Modellierungs- und Berechnungsaufwand für Standardgeometrien ist gering. Bei komplexen Geometrien sind die Berechnungszeiten dagegen sehr hoch.

#### Referenzen

- [1] Moser F, Jacobs L J, Jianmin Qu. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. NDT&E International 32 (1999) 225-234
- [2] CIVA Handbuch: EXTENDE 2017