

# Verwendung des auf Raytracing basierenden Löfers BEAM zur Auswertung von Übertragungsfunktionen im Zeitbereich

Ralf Burgschweiger<sup>1</sup>, Ingo Schäfer<sup>2</sup>, Martin Ochmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich II, Projektgruppe Computational Acoustics, 13353 Berlin, E-Mail: [burgi@beuth-hochschule.de](mailto:burgi@beuth-hochschule.de), [ochmann@beuth-hochschule.de](mailto:ochmann@beuth-hochschule.de)

<sup>2</sup> Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen (WTD71), Maritime Technologie und Forschung, Akustische Modellierung (GF640), 24148 Kiel, E-Mail: [ingo5schaefer@bundeswehr.org](mailto:ingo5schaefer@bundeswehr.org)

## Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Computational Acoustics“ wurde in den letzten Jahren der auf Raytracing basierende Löser BEAM zur Ermittlung des rückgestreuten Schalldrucks im Fernfeld entwickelt. Dieser kann die Streuung an komplexen Strukturen, die aus Fluiden und / oder elastischen Materialien (in Form dünner Schichten) zusammengesetzt sind, berechnen. Aufgrund seiner hohen Rechengeschwindigkeit eignet er sich daher gut für Sweeps über einen vorgegebenen Frequenzbereich.

Der Beitrag stellt eine Erweiterung des Postprozessors vor, welcher eine Übertragungsfunktion mittels der FFT in eine zeitliche bzw. räumliche Impulsantwort umwandeln und grafisch, auch in 3D, darstellen kann. Diese Darstellung ermöglicht dem Anwender eine visuelle Zuordnung der Signale zum äußeren und ggf. inneren Aufbau der betrachteten Objekte.

An einer komplexen Struktur mit unterschiedlichen Materialkombinationen werden erste Resultate für das rückgestreute Schallfeld vorgestellt, analysiert und, soweit verfügbar, mit Ergebnissen von BEM- und FEM-Berechnungen verglichen.

## Grundlagen des BEAM-Verfahrens

Das BEAM-Verfahren ist ein strahlenbasiertes Lösungsverfahren, welches mittels einer Plane-Wave-Schallquelle die auf eine Struktur auftreffenden „Start“-Strahlen ermittelt. Dabei können Strahlen mit fester „Größe“ oder element-spezifische Strahlen (einer pro Element) verwendet werden.

Die Strahlverfolgung erfolgt bis zu einem Level  $L_{b,max}$ , berücksichtigt Schalenrandbedingungen und/oder Transmissions- bzw. Reflexionsfaktoren, und ermittelt daraus transmittierte bzw. reflektierte „Kinder“-Strahlen und deren Druckanteile. Die Abb. 1 und 2 zeigen exemplarisch den Verlauf der Strahlen an einer Teststruktur bis zu einem Level  $L_{b,max} = 5$ , wobei die äußere Schale sowohl Transmissions- als auch Reflektionsanteile besitzt, während der innere Winkel (gelb) schallhart ist und damit voll reflektiert.

Um dabei die von einem Strahl „getroffenen“ Elemente zu finden, ohne einen zeitaufwändigen  $1:N_{elem}$ -Vergleich durchführen zu müssen, wird zur Treffererkennung ein Boxing-Verfahren aus der Fast Multipole-Methode [1] verwendet.

Eine Nachlaufrechnung liefert die Werte des rückgestreuten Schalls im Fernfeld an vorgegebenen Feldpunkten. Die mathematischen / physikalischen Grundlagen des Verfahrens wurden in [2] vorgestellt, Ergebnisse in [3] und [4].

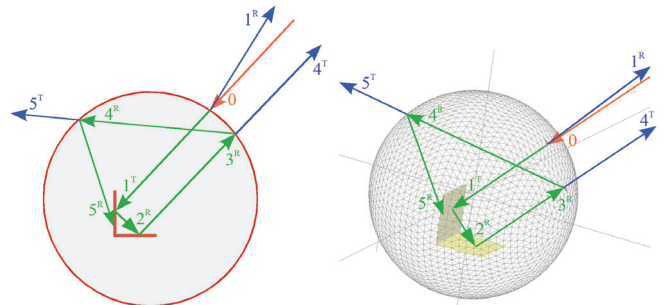


Abb. 1: 2D-Strahlverfolgung bis Level 5

Abb. 2: 3D-Strahlverfolgung bis Level 5

## Verwendetes Modell

Das verwendete Modell besteht aus einem Kugeloberflächenabschnitt („äußere Schale“) und aus einer Kegelschale, die mit einer runden Platte abgedeckt ist (insg. 13.084 Elemente).

Die Abb. 3 und 4 zeigen das Modell in 3D (schattiert) bzw. als teilweises 3D-Gittermodell zur Verdeutlichung des Aufbaus.

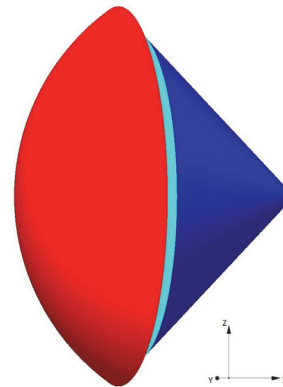


Abb. 3: schattiertes 3D-Modell

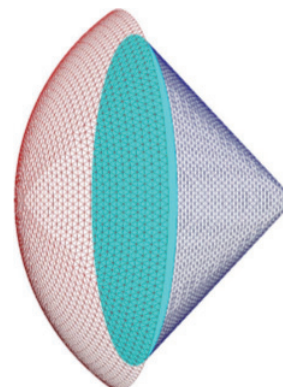
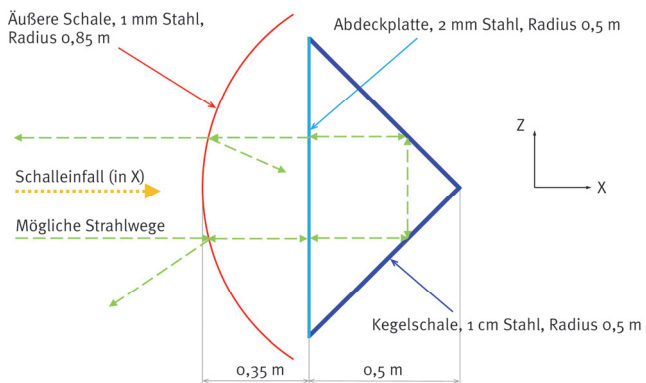


Abb. 4: teilweise gerastertes 3D-Modell

Die Abb. 5 zeigt einen Querschnitt des Modells und die relevanten Materialien und Maße. Inner- und außerhalb der Strukturen befindet sich Wasser mit einer Schallgeschwindigkeit von  $c_{water} = 1.500$  m/s.



**Abb. 5:** Querschnitt und Dimensionen des verwendeten Modells

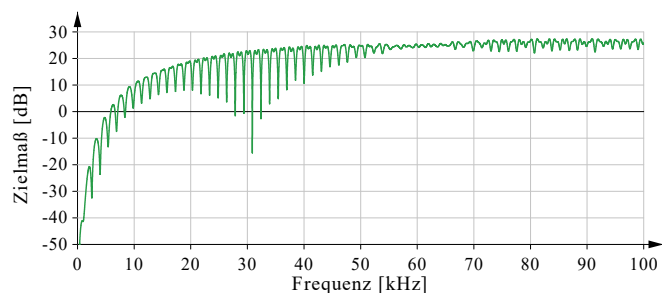
Der Schalleinfall verläuft in positiver X-Richtung und trifft somit senkrecht auf die äußere Schale.

Für das Raytracing ergibt sich dabei eine große Anzahl an möglichen Wegen, es wurde daher für dieses Modell ein maximaler Strahlverfolgungslevel mit  $L_{b,max} = 9$  festgelegt.

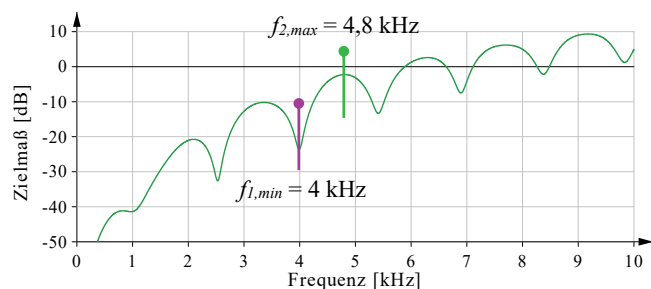
### Berechnung der Übertragungsfunktion (Frequenzsweep)

Mittels des BEAM-Verfahrens wurde der rückgestreute Schalldruck im Fernfeld für einen Frequenzbereich zwischen 2 Hz und 100 kHz bei einer Schrittweite von  $\Delta f = 2$  Hz ( $N_{freq} = 50.000$ ) berechnet.

Abb. 6 zeigt den ermittelten Verlauf des Schalldruckpegels an einem monostatischen Feldpunkt (bei -10 km auf der X-Achse), Abb. 7 einen Ausschnitt davon bis 10 kHz.



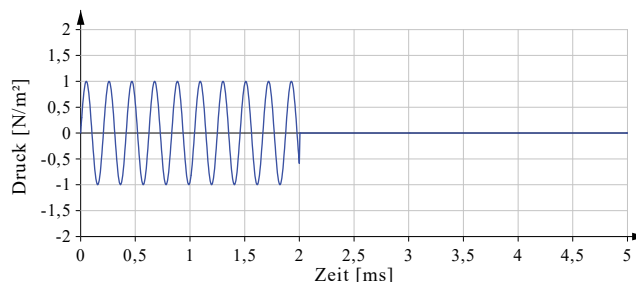
**Abb. 6:** Normierter Schalldruckpegel im Fernfeld  $f = 2$  Hz ... 100 kHz, BEAM (Rechenzeit: ca. 108 s)



**Abb. 7:** Normierter Schalldruckpegel im Fernfeld  $f = 2$  Hz ... 10 kHz (Ausschnitt)

### Berechnung der Impulsantwort mittels FFT

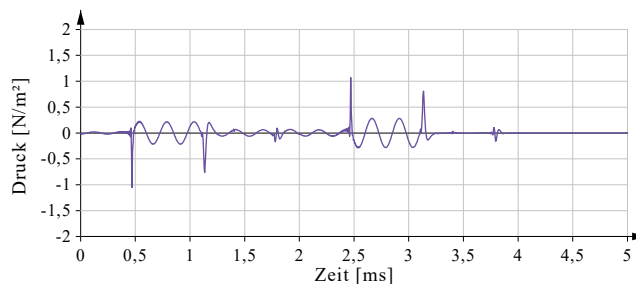
Mit Hilfe der FFT und der gewünschten Übertragungsfunktion im Frequenzbereich wird aus einem Sinus-Impuls vorgegebener Dauer (hier  $\Delta t_{in} = 2$  ms, vgl. Abb. 8) und fester Frequenz eine entsprechende Impulsantwort im Zeitbereich generiert.



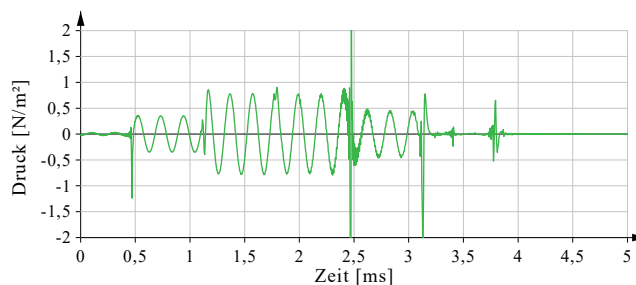
**Abb. 8:** Anregungsimpuls,  $\Delta t_{in} = 2$  ms,  $f = 4,8$  kHz

Als Beispiel für Anregungsfrequenzen wurden  $f_{1,min} = 4$  kHz und  $f_{2,max} = 4,8$  kHz gewählt, da sich hier ein Minimum bzw. Maximum in der o.a. Übertragungsfunktion (siehe Markierungen in Abb. 7) erkennen lässt.

Die zeitliche Zuordnung der Druckwerte wurde gemäß des verwendeten Empfangspunkts entfernungskorrigiert, sodass der Zeitpunkt  $t = 0$  dem „Beginn“ der Antwort entspricht.

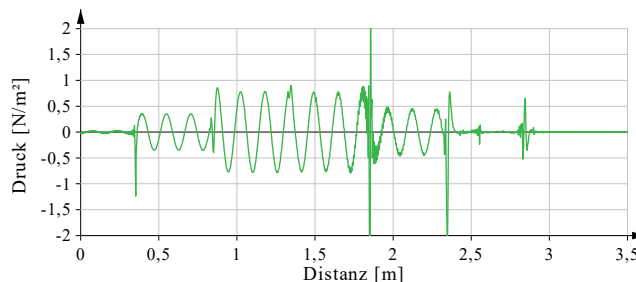


**Abb. 9:** Impulsantwort für  $f_{1,min} = 4,0$  kHz (Druck über Zeit)



**Abb. 10:** Impulsantwort für  $f_{2,max} = 4,8$  kHz (Druck über Zeit)

Ein Zeitabschnitt von 1 ms entspricht bei  $c_{water} = 1.500$  m/s einer Laufdistanz von ca. 0,75 m (Hin- und Rückweg).



**Abb. 11:** Impulsantwort für  $f_{2,max} = 4,8$  kHz (Druck über Abstand)

### 3D-Visualisierung

Der Postprozessor bietet die Option, die erhaltenen Impulsantworten in die 3D-Darstellung einzublenden (Abb. 12).

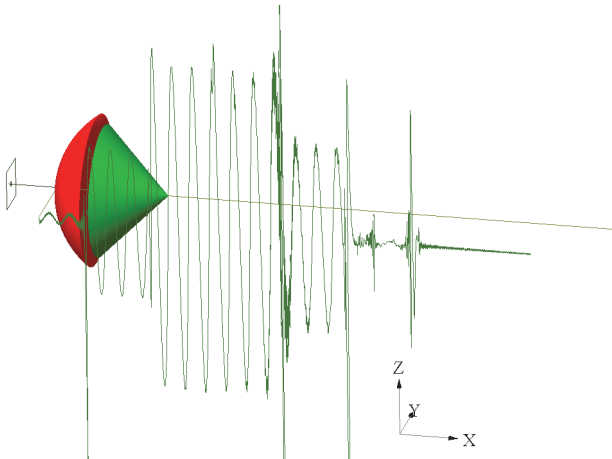


Abb. 12: Visualisierung der Impulsantwort in 3D für  $f_{2,max} = 4,8$  kHz

### Auswertung

Wählt man in der 3D-Ansicht eine geeignete Betrachtungsebene, so lassen sich die auftretenden Ereignisse, vor allem in Verbindung mit der „Druck über Abstand“-Darstellung (vgl. Abb. 11) leichter zuordnen.

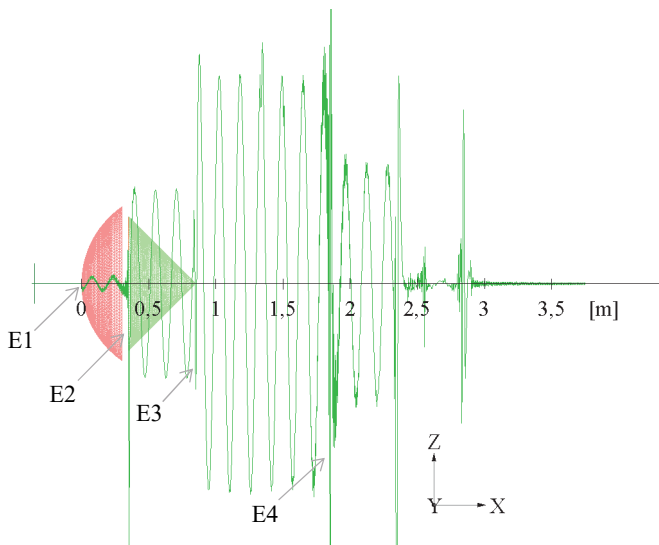


Abb. 13: Visualisierung der Impulsantwort in 3D in der XZ-Ebene für  $f_{2,max} = 4,8$  kHz (Zahlenwerte repräsentieren die Laufzeitdistanz)

E1: erste Antwort der äußeren Schale

E2: Antwort der runden Platte bei ca. 0,47 ms ( $\hat{=}$  ca. 0,35 m)

E3: „starke“ Antwort des Kegels („Doppelspiegel“), alle Laufzeiten innerhalb des Kegels (ca. 1,33 ms  $\hat{=}$  ca. 1 m) sind identisch und der Druck bei  $f_{2,max}$  in „Phase“

E4: „Ende“ des Verlaufs innerhalb des Kegels, Abklingen der Antwort ( $t_{E4} - t_{E2} \approx \Delta t_{in} = 2$  ms)

### Vergleich mit anderen Berechnungsverfahren

Insbesondere im „niedrigen“ Frequenzbereich (hier bis ca. 10 kHz) liefert das BEAM-Verfahren aufgrund der verwendeten Fernfeld-Approximationen häufig unzureichende Ergebnisse.

Abb. 14 zeigt einen Vergleich der Übertragungsfunktionen für einen Frequenzbereich bis 12 kHz für verschiedene Rechenverfahren (BEAM [—], Indirekte BEM [—] und kombiniert mit einer FEM-Schalenrandbedingung für die äußere Schale [—]).

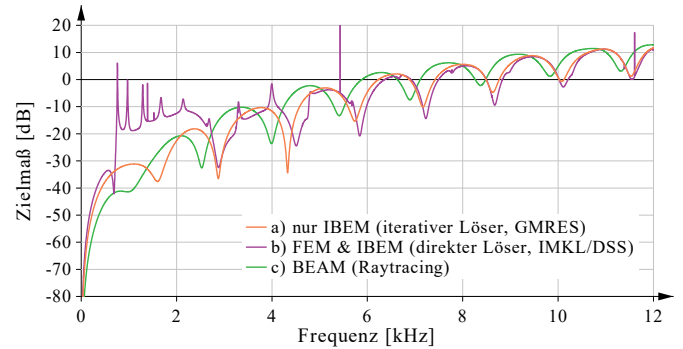


Abb. 14: Verlauf des Schalldruckpegels im Bereich bis 12 kHz unter Verwendung verschiedener Berechnungsverfahren

Hinweis zu den Rechenzeiten (6.000 Frequenzen):

- nur IBEM: ca. 2,5 s pro Frequenz (13.084 Freiheitsgrade, ca. 4:10 h)
- FEM & IBEM-Lösung: ca. 25 s pro Frequenz (28.218 Freiheitsgrade, 41:45 h)

Bei niedrigeren Frequenzen weichen die Verfahren deutlich voneinander ab, sie nähern sich jedoch zu den hohen Frequenzen immer weiter an. Damit bietet sich die Generierung einer „zusammengesetzten“ Übertragungsfunktion an.

Der Postprozessor wurde um eine entsprechende Kombinationsoption inkl. Glättungsfunktion erweitert, wobei die verwendeten Bereiche bzw. Übergänge getrennt definiert werden können.

Das Resultat (Ausschnitt bis 20 kHz) zeigt Abb. 15.

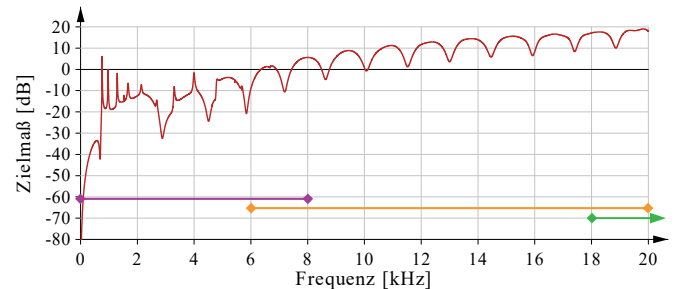


Abb. 15: kombinierter Verlauf des Schalldruckpegels im Bereich bis 20 kHz  
 FEM [—]: bis 8 kHz  
 IBEM [—]: 6 - 20 kHz  
 BEAM [—]: 18 - 100 kHz

## Zusammenfassung und Ausblick

Das BEAM-Verfahren lässt sich gut zur schnellen Generierung von FFT-geeigneten Übertragungsfunktionen (mit äquidistanten Frequenzen) einsetzen, die resultierenden Impulsantworten spiegeln das erwartete Verhalten der Teststruktur wieder.

Eine Berechnung mit anderen numerischen Verfahren (BEM, IBEM, FEM, siehe auch [5]) ist machbar, benötigt jedoch einen deutlich größeren Zeitaufwand und ist daher i.d.R. nur für Teile des gewünschten Frequenzbereichs sinnvoll.

Eine erste Option zur Zusammensetzung einer Übertragungsfunktion aus einzelnen Teillösungen wurde implementiert, bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen.

## Referenzen / Literatur

- [1] R. Burgschweiger, M. Ochmann, I. Schäfer, B. Nolte:  
„Performance-Optimierung und Grenzen eines Multi-Level Fast Multipole Algorithmus für akustische Berechnungen“, DAGA 2012, Darmstadt
- [2] I. Schäfer, R. Burgschweiger, B. Nolte:  
„BEAM Teil I: Mathematisch-physikalische Grundlagen eines strahlenbasierten Löser zur approximativen Ermittlung der Schallrückstreuung dünnwandiger Objekte“, DAGA 2014, Oldenburg
- [3] R. Burgschweiger, I. Schäfer, M. Ochmann, B. Nolte:  
„BEAM Teil II: Implementierung und Ergebnisse“, DAGA 2014, Oldenburg
- [4] R. Burgschweiger, I. Schäfer, B. Nolte, M. Ochmann:  
„Implementierung eines Analyseverfahrens zur Ermittlung pegelrelevanter Bereiche von Strukturen innerhalb von dünnwandigen Körpern unter Verwendung des Raytracing-Lösers BEAM“, DAGA 2015, Nürnberg
- [5] R. Burgschweiger, I. Schäfer, M. Ochmann:  
„Übersicht und Vergleich der Ergebnisse von Verfahren zur Ermittlung des rückgestreuten Schalldruckpegels von dünnwandigen Strukturen im Fernfeld“, DAGA 2016, Aachen

Besuchen Sie die Webseite unserer Projektgruppe:  
<http://projekt.beuth-hochschule.de/ca>