

Ralf Burgschweiger<sup>[1]</sup>, Ingo Schäfer<sup>[2]</sup>, Martin Ochmann<sup>[1]</sup>, Bodo Nolte<sup>[2]</sup>

[1] Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich II, Projektgruppe Computational Acoustics

[2] Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik, Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD71/FWG)

### Abstrakt

Die Implementierung des in Teil I beschriebenen BEAM-Verfahrens zur approximativen Ermittlung der Schallabstrahlung dünnwandiger Objekte unter Wasser erfordert schnelle und komplexe Verfahren zur Ermittlung der betroffenen Oberflächenanteile und der Nachverfolgung der transmittierten und reflektierten Strahlen. Da primär monostatische Berechnungen benötigt werden, bei denen sich die Schallquelle analog zum betrachteten Feldpunkt bewegt, sind hier entsprechende Optimierungen erforderlich.

Da das Verfahren 3D-Randelemente von diskretisierten Oberflächen verwendet und um den Vergleich mit anderen Lösungsmethoden zu erleichtern, wurde es in einen bereits vorhandenen BEM-Code (bestehend aus Pre-/Postprozessor und Calculator) integriert und getestet.

In dem Beitrag werden einige spezielle Aspekte der Implementierung des Verfahrens näher beleuchtet (parallelierter Hit- und Verfolgungsalgorithmus, Multifrequenz-Optimierung etc.) und erste Ergebnisse an Objekten mit dünnwandigen Außen- und Innenkörpern vorgestellt.

### Grundlagen des BEAM-Verfahrens

Das sog. BEAM-Verfahren ist ein strahlenbasiertes Lösungsverfahren, welches unter Verwendung einer Plane-Wave-Schallquelle zunächst die auf eine Struktur auftreffenden „Start“-Strahlen ermittelt. Es können wahlweise Strahlen mit einer definierten Größe (Abb. 1) oder elementspezifische Strahlen (einer pro Element, Abb. 2) verwendet werden.

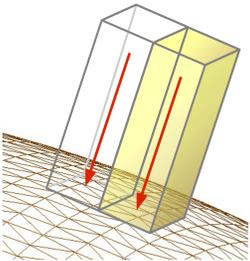


Abb. 1: Strahlen fester Größe

Vorteil: wenige Strahlen, flexible Anzahl  
 Nachteil: schlechte Oberflächenabstastung

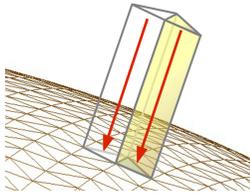


Abb. 2: ein Strahl pro Element

Vorteil: exakte Oberflächenabstastung  
 Nachteil: viele Strahlen

Allerdings kann die Verwendung von Strahlen mit fester Größe insbesondere unter flachen Einfallswinkeln zu deutlichen Verzerrungen der approximierten Oberfläche und damit zu Rechenfehlern führen (Abb. 3 und 4)

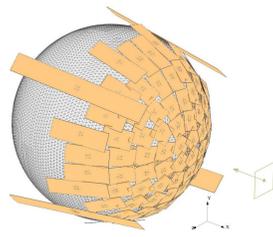


Abb. 3: Approximierte Oberfläche ohne Eckenkorrektur

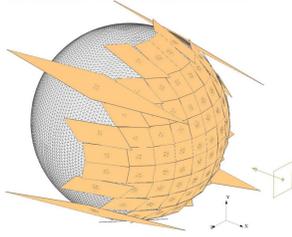
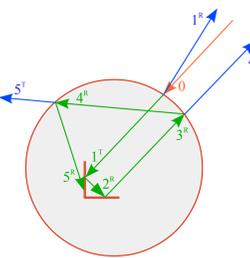
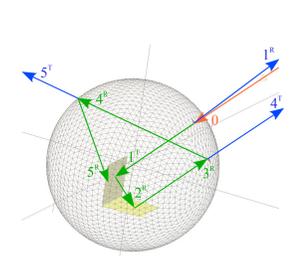


Abb. 4: Approximierte Oberfläche mit Eckenkorrektur

Die Strahlverfolgung erfolgt bis zu einem gegebenen max. Level  $L_{b,max}$ , berücksichtigt Schalenrandbedingungen oder Transmissions-/ Reflexionsfaktoren, und ermittelt daraus die transmittierten bzw. reflektierten Strahlen und deren komplexe Druckanteile. Die Abb. 5 und 6 zeigen einen solchen Verlauf bis zu einem max. Level  $L_{b,max} = 5$ , wobei die äußere Schale Transmissions- und Reflektionsanteile besitzt, während der innere Winkel schallhart ist.


 Abb. 5: 2D-Strahlverfolgung bis Level 5 mit  $n^t$ : transmittierter Strahl,  $n^r$ : reflektierter Strahl, 0...5: „Level“ des Strahls

 Abb. 6: 3D-Strahlverfolgung bis Level 5 mit  $n^t$ : transmittierter Strahl,  $n^r$ : reflektierter Strahl, 0...5: „Level“ des Strahls

Um die jeweils von einem Strahl „getroffenen“ Elemente zu ermitteln, ohne einen zeitaufwendigen 1: $N_{\text{Elemente}}$ -Vergleich durchführen zu müssen, wird ein Boxing-Verfahren aus der Fast Multipole-Methode verwendet (Abb. 7, siehe [2] und [3]).

| Box-Level | Elemente  | Anz. Boxen |
|-----------|-----------|------------|
| 1         | 1.000.000 | 1          |
| 2         | 125.000   | 8          |
| 3         | 15.625    | 64         |
| 4         | 1.953     | 512        |
| 5         | 244       | 4.096      |
| 6         | 30        | 32.768     |
| 7         | 4         | 262.144    |

Tab. 1: Übersicht über die Größen eines 3D-Clusterbaums für eine Anzahl von 1 Mio. Elementen

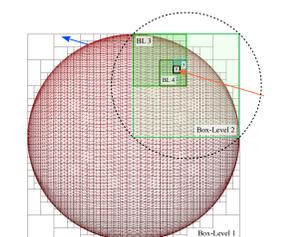


Abb. 7: Boxing-Verfahren zur Ermittlung eines getroffenen Elements (hier für eine gefundene Box auf Level 6)

Eine entsprechende Nachlaufrechnung liefert dann die Werte des rückgestreuten Schalls im Fernfeld an vorgegebenen Feldpunkten zurück. Die mathematischen und physikalischen Grundlagen des Verfahrens werden in [1] vorgestellt.

### Parallelisierbarkeit

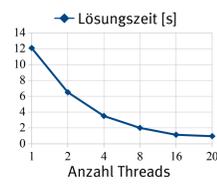
Das Verfahren lässt sich sehr gut parallelisieren, in dem entsprechende Teilmengen an „Start“-Strahlen den verfügbaren CPU-Kernen zugewiesen werden, da die Nachverfolgung eines einzelnen Strahls unabhängig von allen anderen ist.

Allerdings kann die Lösungszeit nicht ganz proportional reduziert werden, da die Anzahlen an transmittierten bzw. reflektierten „Kinder“-Strahlen variieren können und sich somit keine 100%-ige CPU-Auslastung erzielen lässt.

Tab. 2 zeigt exemplarisch die Lösungszeiten des Verfahrens.

| Anz. Threads | Beams pro Thread | Lösungszeit |
|--------------|------------------|-------------|
| 1            | 2.920            | 12,090 s    |
| 2            | 1.460            | 6,506 s     |
| 4            | 730              | 3,510 s     |
| 8            | 365              | 2,012 s     |
| 16           | 183              | 1,139 s     |
| 20           | 146              | 0,967 s     |

Tab. 2: Lösungszeiten für unterschiedliche Thread-Anzahlen



### Optimierung für monostatische Frequenzsweeps

Häufig soll die monostatische Rückstreuung eines Objektes ermittelt werden, wobei die Schallquelle auf jeden Feldpunkt positioniert und auf das Objekt ausgerichtet wird. In der Regel wird ein äußerer Durchlauf pro Frequenz und ein innerer Durchlauf über die Feldpunkte durchgeführt. Damit wäre die Rechenzeit  $\Delta t_{tot}$  linear abhängig von den Berechnungszeiten pro Frequenz  $\Delta t_f$  und Feldpunkt  $\Delta t_{src}$  sowie der Anzahl der Frequenzen  $N_f$  und der Feldpunkte  $N_{fp}$  (Eq. 1):

$$\Delta t_{tot,conv} \approx (\Delta t_{src} + \Delta t_f) \times N_f \times N_{fp} \quad \text{Eq. 1}$$

Für das BEAM-Verfahren ist es jedoch sinnvoll, diese Reihenfolge so zu ändern, dass der äußere Durchlauf über die Feldpunkte erfolgt und der innere über die Frequenzen. Da alle geometrischen Berechnungen frequenzunabhängig sind ( $\Delta t_{src}$ ), müssen nur diese pro Feldpunkt neu erfolgen, die Berechnung der Transmissions- und Reflektionsanteile ( $\Delta t_f$ ) kann innerhalb des Frequenzloops erfolgen (Eq. 2):

$$\Delta t_{tot,opt} \approx (\Delta t_{src} + \Delta t_f) \times N_f + (\Delta t_f \times (N_{fp} - 1)) \quad \text{Eq. 2}$$

Damit lässt sich die Rechenzeit ab der 2. Frequenz auf ca. 1/20 des Wertes der ersten Berechnung reduzieren (Tab. 3).

| Frequenzen $N_f$ (Anzahl) | Lösungszeit $\Delta t_{tot,conv}$ (konventionell) | Lösungszeit $\Delta t_{tot,opt}$ (optimiert) | Zeit pro Freq. $\Delta t_{f,opt}$ (optimiert) |
|---------------------------|---|--|---|
| 1                         | 198 s   | 198 s  | 198 s   |
| 2                         | 396 s   | 209 s  | 104,5 s                                       |
| 21                        | 8.320 s   | 401 s  | 19,1 s  |

Tab. 3: Reduzierung der Rechenzeiten bei Frequenzsweeps

### Ergebnisse – Beispiel 1: Ikosaeder (bistatisch)

Anhand eines Ikosaeders (Abb. 8, 113.940 Elemente,  $\varnothing$  ca. 0,33 m) sollen die Ergebnisse des Verfahrens aufgezeigt werden. Dabei wird der normierte rückgestreute Schalldruckpegel  $L_{p,n}$  bei einer Frequenz  $f = 100$  kHz auf einer Beobachtungsfläche (Kugelsegment, 8.457 Elemente, 4.360 Knoten, Abb. 9) in einer Entfernung von 10 km ermittelt.

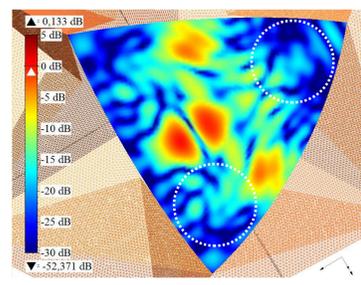


Abb. 8: Ikosaeder (schattiert)



Abb. 9: Beobachtungsfläche

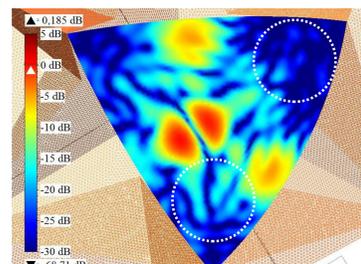
Die Referenzlösung wurde mittels eines konventionellen BEM-Verfahrens direkt und iterativ berechnet (Abb. 10).


 Abb. 10:  $L_{p,n}$  Ikosaeder, bistatische Rechnung, BEM, matrix-basiert, schallhart,  $f = 100$  kHz

**direkter Löser, matrix-basiert (Intel MKL)**  
 $\Delta t_{solve}$ : 11.116 s  
 (3:05:13 h)  
 $S_{matrix}$ : 198.095 MB (!)

**iterativer Löser, matrix-basiert (GMRES)**  
 $N_{iter}$ : 76  
 $\Delta t_{solve}$ : 709 s  
 $\epsilon_{iter}$ :  $8,8 \times 10^{-7}$

Der Vergleich mit dem Ergebnis des BEAM-Verfahrens (Abb. 11) zeigt an den relevanten Stellen nur geringe Differenzen, lediglich in den „stilleren“ Bereichen ( $< -15$  dB) sind qualitative Unterschiede zu erkennen (weiße Kreise).

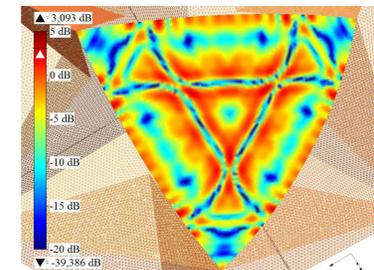

 Abb. 11:  $L_{p,n}$  Ikosaeder, bistatische Rechnung, BEAM-Verfahren, schallhart,  $f = 100$  kHz

**BEAM-Verfahren**  
 $\Delta t_{solve}$ : 0,8 s  
 $S_{beam}$ :  $< 10$  MB

Der Vorteil bezogen auf die Lösungszeit ist allerdings klar erkennbar.

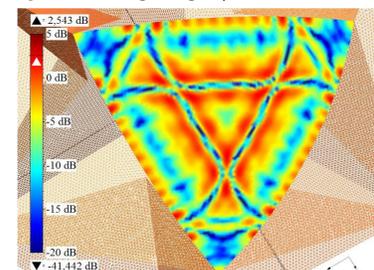
### Ergebnisse – Beispiel 2: Ikosaeder (monostatisch)

Dies wird noch deutlicher, wenn eine monostatische Rechnung für alle 4.360 Knoten (= Feldpunkte) durchgeführt wird. Da ein direkter Gleichungslöser die Verwendung von mehreren rechten Seiten, die sich aus den Veränderungen der Position der Schallquelle ergibt, ohne Neufaktorisierung der zugrundeliegenden Matrix ermöglicht, steht auch hier eine Referenzlösung zur Verfügung (Abb. 12).


 Abb. 12:  $L_{p,n}$  Ikosaeder, monostatische Rechnung, BEM, matrix-basiert, schallhart,  $f = 100$  kHz

**direkter Löser, matrix-basiert (Intel MKL)**  
 $\Delta t_{solve}$ : 31.660 s  
 (8:47:40 h)  
 $S_{matrix}$ : 198.094.537 MB

Im Vergleich mit dem Ergebnis der BEAM-Verfahrens (Abb. 13) sind nur geringe qualitative Abweichungen erkennbar.


 Abb. 13:  $L_{p,n}$  Ikosaeder, monostatische Rechnung, BEAM-Verfahren, schallhart,  $f = 100$  kHz

**BEAM-Verfahren**  
 $\Delta t_{solve}$ : 65,8 s  
 $S_{beam}$ :  $< 10$  MB

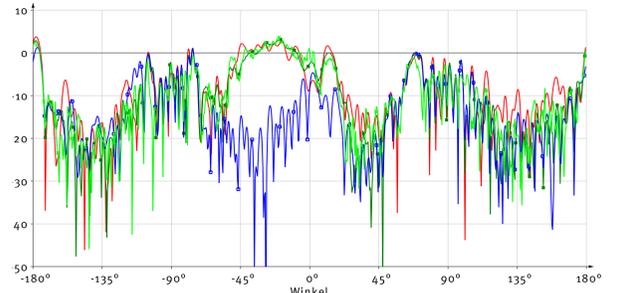
### Ergebnisse – Beispiel 3: komplexer Körper (monostatisch)

Anhand eines komplex geformten Körpers mit Ecken, Kanten und einem Durchbruch (Abb. 14) sollen die Resultate für die konventionelle BEM, die approximative Kirchhoff-Methode und das BEAM-Verfahren gezeigt werden.



Abb. 14: komplex geformter Körper (Schallhart)

Abb. 15 zeigt den normierten Schalldruckpegel in der X-Y-Ebene (monostatischer Fall) für eine Entfernung von 10 km.


 Abb. 15:  $L_{p,n}$ , normierter Schalldruck [dB] in der X-Y-Ebene (10 km Abstand),  $f = 10$  kHz

Die Abweichungen zwischen der BEM (rot) und den beiden BEAM-Lösungen (grün) bewegen sich in den relevanten Bereichen um  $\pm 3$  dB, die Abweichung der Kirchhoff-Approximation (blau) ist vor allem im Bereich zwischen  $-45^\circ$  und  $0^\circ$  (mehrfach reflektierender Triple-Spiegel) klar erkennbar.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die erzielten Resultate zeigen die gute Übereinstimmung zwischen dem approximativen BEAM-Verfahren und der konventionellen BEM-Methode für schallharte Probleme.

Sein Vorteil liegt primär in der hohen Geschwindigkeit, vor allem bei monostatischen Berechnungen für mehrere Frequenzen und, im Vergleich zur approximativen Kirchhoff-Methode, in der Möglichkeit, auch Bereiche mit mehrfachen Reflexionen berücksichtigen zu können. Allerdings kann das Verfahren nur für Betrachtungen im Fernfeld eingesetzt werden, da es keine oberflächenspezifischen Werte liefert.

Die Verwendung des Verfahrens für dünnwandige Strukturen mit Innenkörpern (vgl. Abb. 6) bedarf weiterer Untersuchungen und ist Schwerpunkt der aktuellen Forschungstätigkeit.

### Referenzen

- [1] I. Schäfer, R. Burgschweiger und B. Nolte: „BEAM Teil I: Mathematisch-physikalische Grundlagen eines strahlenbasierten Löser zur approximativen Ermittlung der Schallrückstreuung dünnwandiger Objekte“, DAGA 2014, Oldenburg, Deutschland (Vortrag am Do., 13.03.2014, 10:00 Uhr, Raum A1 0-008)
- [2] R. Burgschweiger, I. Schäfer und M. Ochmann: „A Multi-Level Fast Multipole Algorithm (MLFMM) for calculating the Sound scattered from Objects within Fluids“, Proceedings of the ICA, 2010, Sydney, Australia
- [3] R. Burgschweiger: „Objektorientierte Implementierung eines Randelementverfahrens zur Simulation der akustischen Streuung an Objekten für ungekoppelte und gekoppelte Probleme“ (Dissertation), Technische Universität Berlin, Deutschland, 2012, OPU: URN: urn:nbn:de:kobv:83-opus-34315, http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2012/34315/

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