

# BEAM, Teil II: Implementierung und Ergebnisse

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

<sup>1</sup> Beuth Hochschule für Technik Berlin, 13353 Berlin, E-Mail:burgi@beuth-hochschule.de

<sup>2</sup> Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik (FWG) der WTD71, 24148 Kiel

## Grundlagen des BEAM-Verfahrens

Das 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 oder elementspezifische Strahlen (einer pro Element) verwendet werden.

Die mathematischen und physikalischen Grundlagen des Verfahrens werden in [1] vorgestellt.

## Parallelisierbarkeit

Das Verfahren lässt sich 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. 1 zeigt exemplarisch die Lösungszeiten des Verfahrens.

**Tab. 1: Lösungszeiten für unterschiedliche Thread-Anzahlen**

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

## Monostatische Frequenzsweeps

Häufig soll die monostatische Rückstreuung eines Objektes ermittelt werden, wobei die Schallquelle auf jeden Feldpunkt positioniert und auf das Objekt ausgerichtet wird.

I. d. R. 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):

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

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):

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

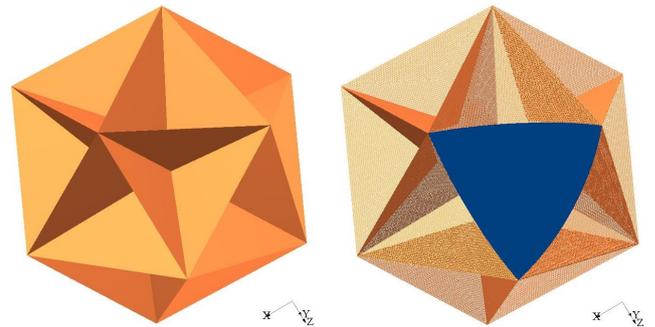
Damit lässt sich die Rechenzeit ab der zweiten Frequenz (bei insgesamt 21 Frequenzen) auf ca. 1/20 des Wertes der ersten Berechnung reduzieren (Tab. 2).

**Tab. 2: Reduzierung der Rechenzeiten bei Frequenzsweeps**

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

## Beispiel 1: Ikosaeder (bistatisch)

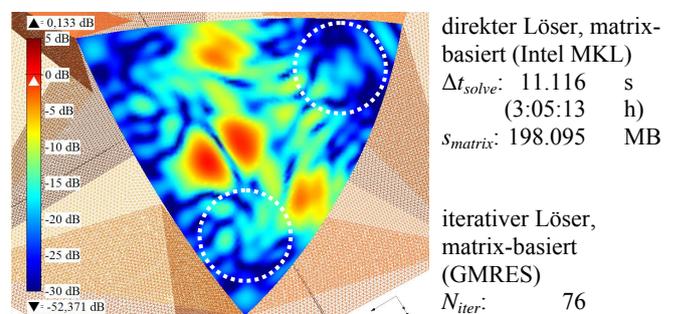
Anhand eines Ikosaeders (Abb. 1, 113.940 Elemente, Außendurchmesser ca. 0,33 m, 20 Triplespiegel) sollen die Ergebnisse des BEAM-Verfahrens aufgezeigt werden. Dabei wird der normierte rückgestreute Schalldruckpegel  $L_{p,rb}$  bei einer Frequenz  $f = 100$  kHz auf einer Beobachtungsfläche (Kugeloberflächensegment, 8.457 Elemente, 4.360 Knoten, Abb. 2) in einer Entfernung von 10 km berechnet.



**Abb. 1:** Ikosaeder (schattiert)

**Abb. 2:** Beobachtungsfläche

Die Referenzlösung wurde mittels eines konventionellen BEM-Verfahrens direkt und iterativ berechnet (Abb. 3).

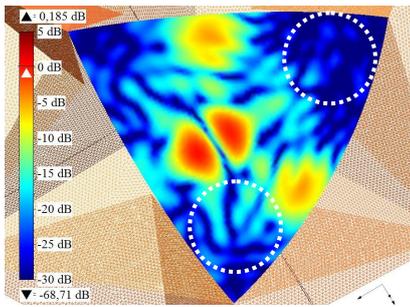


**Abb. 3:**  $L_{p,rb}$  Ikosaeder, bistatisch, BEM, matrix-basiert, schallhart,  $f = 100$  kHz

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  
 $e_{iter}$ :  $8,8 \times 10^{-7}$

Der Vergleich mit dem Ergebnis des BEAM-Verfahrens (Abb. 4) zeigt an den relevanten Stellen nur geringe Differenzen, lediglich in den stilleren Bereichen ( $< -15$  dB) sind qualitative Unterschiede zu erkennen (weiße Kreise).



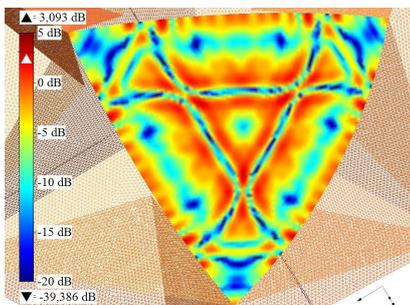
BEAM-Verfahren  
 $\Delta t_{solve}$ : 0,5 s  
 $S_{beam}$ : < 10 MB

Abb. 4: Iksaeder, bistatisch, BEAM-Verfahren, schallhart,  $f = 100$  kHz

Der Vorteil bezogen auf die Lösungszeit ist allerdings klar erkennbar.

### Beispiel 2: Iksaeder (monostatisch)

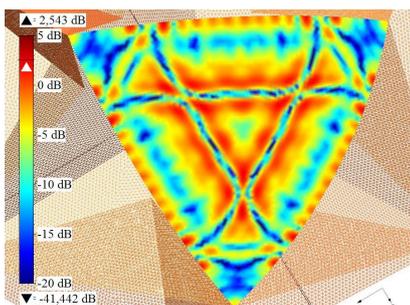
Dies wird noch deutlicher, wenn eine monostatische Rechnung für alle 4.360 Knoten der Beobachtungsfläche durchgeführt wird. Da ein direkter Gleichungslöser die Verwendung von mehreren rechten Seiten, die sich aus den Veränderungen der Position der Schallquelle ergibt, ohne Neufaktorisierung der zugrundeliegenden Matrix ermöglicht, steht auch hier eine Referenzlösung zur Verfügung (Abb. 5).



direkter Löser, matrixbasiert (Intel MKL)  
 $\Delta t_{solve}$ : 31.667 s  
 (8:47:40 h)  
 $S_{matrix}$ : 198.095 MB

Abb. 5: Iksaeder, monostatisch, BEM, matrixbasiert, schallhart,  $f = 100$  kHz

Im Vergleich mit dem Ergebnis des BEAM-Verfahrens sind nur geringe qualitative Abweichungen erkennbar (Abb. 6).



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

Abb. 6: Iksaeder, monostatisch, BEAM, schallhart,  $f = 100$  kHz

### Beispiel 3: komplexer Körper (monostatisch)

Anhand eines komplex geformten Körpers mit Ecken, Kanten und einem Durchbruch (Abb. 7) sollen die Resultate für die konventionelle BEM, die approximative Kirchhoff-Methode und das BEAM-Verfahren gezeigt werden.



Abb. 7: komplex geformter Körper (schallhart)

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

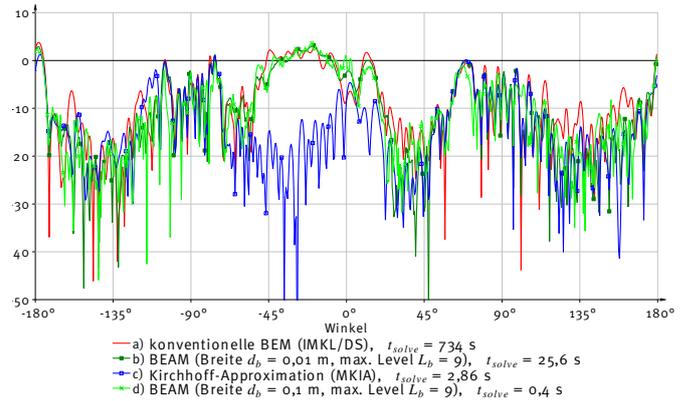


Abb. 8: normierter Schallpegel [dB] in der X-Y-Ebene (10 km Abstand zum Körper),  $f = 10$  kHz

Die Differenzen zwischen der BEM (rot) und den 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 für dünnwandige Außenstrukturen mit inneren Körpern nach [1] bedarf weiterer Untersuchungen und ist Schwerpunkt der aktuellen Forschungstätigkeit.

### Literatur

- [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
- [2] R. Burgschweiger, I. Schäfer und M. Ochmann: „A Multi-Level Fast Multipole Algorithm (MLFMM) for calculating the Sound scattered from Objects within Fluids“, ICA 2010, Sydney, Australia
- [3] R. Burgschweiger: „Objektorientierte Implementierung eines Randelementverfahrens zur Simulation der akustischen Streuung an Objekten für ungekoppelte und gekoppelte Probleme“ (Dissertation), TU Berlin, Deutschland, 2012

Weitere Informationen sowie das Poster im PDF-Format finden Sie auf der Webseite unserer Projektgruppe:

<http://projekt.beuth-hochschule.de/ca>