

Implementierung eines Analyseverfahrens zur Ermittlung pegelrelevanter Bereiche von Strukturen innerhalb von dünnwandigen Körpern unter Verwendung des Raytracing-Lösers BEAM

Ralf Burgschweiger¹, Ingo Schäfer², Bodo Nolte², Martin Ochmann¹

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

² Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik (FWG) der WTD71, 24148 Kiel

Einsatzbereich des Analyseverfahrens

Zur Reduktion des Rückstreuerverhaltens eines Körpers ist es erforderlich, die Bereiche zu bestimmen, die zu einem hohen akustischen Rückstreupegel führen. Dies ist insbesondere dann sehr aufwändig, wenn die zu betrachtenden inneren Objekte von äußeren Strukturen, bestehend z.B. aus dünnen Schichten, verhüllt werden, und ist mit Hilfe konventioneller Rand- oder Finite-Element-Methoden i.d.R. nicht in akzeptabler Zeit durchführbar.

Das vorgestellte Raytracing-basierte Verfahren ermittelt zunächst in einem ersten Schritt die Rückstreuung aller relevanten Strukturen im Fernfeld und liefert damit Aufschluss über die pegelrelevanten („lauten“) Gebiete im Fernfeld.

Anschließend können durch weitere Raytracing-basierende Berechnungen an explizit ausgewählten Evaluierungspunkten die für den höheren Abstrahlpegel relevanten Bereiche der inneren Strukturen, z. B. Doppel- oder Tripel- spiegel, identifiziert werden. Damit wird es möglich, durch konstruktive Maßnahmen und/oder Materialänderungen das Abstrahlverhalten dieser Bereiche gezielt zu verringern.

BEAM-Verfahren

Das BEAM-Verfahren ist ein strahlenbasiertes Lösungsverfahren, welches unter Verwendung einer einfallenden ebene Welle die auf eine Struktur auftreffenden „Start“-Strahlen ermittelt und unter Berücksichtigung schalen-spezifischer Materialparameter die Reflexions- und Transmissionsfaktoren mittels [1] bzw. [2] berechnet, die zur Erzeugung von neuen, bis zu einem gegebenen Level rekursiv weiter verfolgten „Kinder“-Strahlen verwendet werden (Abb. 1 und 2).

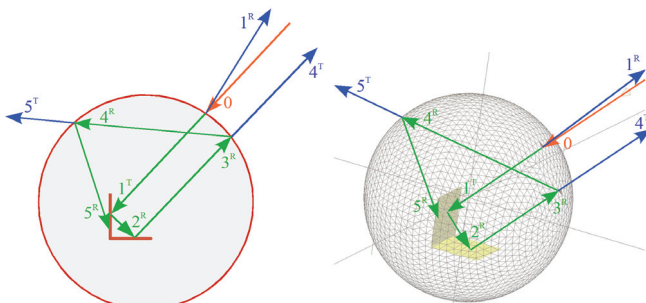


Abb. 1: 2D-Strahlverfolgung bis Level 5

Abb. 2: 3D-Strahlverfolgung bis Level 5

Die mathematisch/physikalischen Grundlagen des Verfahrens wurden 2014 in [3] vorgestellt, die Implementierung und erste Ergebnisse in [4].

Beispielmodell

Die Ergebnisse sollen anhand des folgenden Modells erläutert werden, welches Bestandteil des im September 2014 stattgefundenen Benchmark-Workshops [5] war.

Ein Innenzylinder mit einem Tripel Spiegel an der vorderen abgerundeten Seite (blau, Abb. 3) und 4 Tripel Spiegeln aus abgerundeten Platten an der Hinterseite (grün) befindet sich innerhalb eines konisch zulaufenden und beidseitig abgerundeten äußeren Zylinders (hellblau, Abb. 4). Der Körper bzw. die Tripel Spiegel sind um 30° in Richtung der Längsachse gedreht.

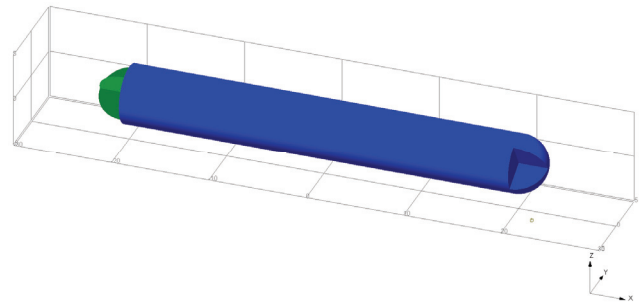


Abb. 3: Innenzylinder mit Tripel Spiegel(n) an den Enden (Länge: 46 m, Radius: 3 m)

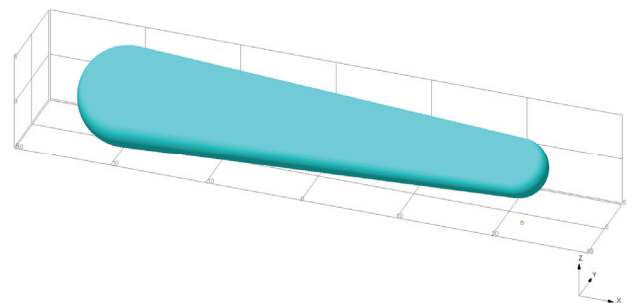


Abb. 4: konischer Außenzylinder (Länge: 49 m, Radius: hinten 5 m, vorne 3 m)

Der Innenzylinder wird als luftgefüllte Stahlschale mit 2 cm Stärke modelliert, der Außenzylinder als 8 mm starke Stahlschale. Im äußeren Gebiet und zwischen Innen- und Außenzylinder befindet sich Wasser. Das daraus generierte Modell besteht aus insgesamt 119.920 Oberflächenelementen mit einer Kantenlänge von ca. 2 cm, und wäre damit für BE-basierende Berechnungen bis ca. 1 kHz verwendbar.

Da jedoch ein Frequenzbereich bis 10...30 kHz abgedeckt werden sollte, was bei einer entsprechenden Elementgröße zu Modellen mit mehr als 10^7 Elementen führen würde, ist hier derzeit keine realistische Lösung mit BE- oder FE-

basierenden Verfahren verfügbar und das Problem daher nur mit einem Raytracing-Verfahren in akzeptabler Zeit lösbar.

Zur Darstellung der Ergebnisse wird eine fein diskretisierte Projektionsoberfläche in Form eines Kugelausschnitts verwendet (Parameter: Längengrad $\pm 180^\circ$, Breitengrad $\pm 20^\circ$, Schrittweite: $0,25^\circ$, Abb. 5), womit diese damit insg. 232.001 Auswertungs- bzw. Feldpunkte umfasst.

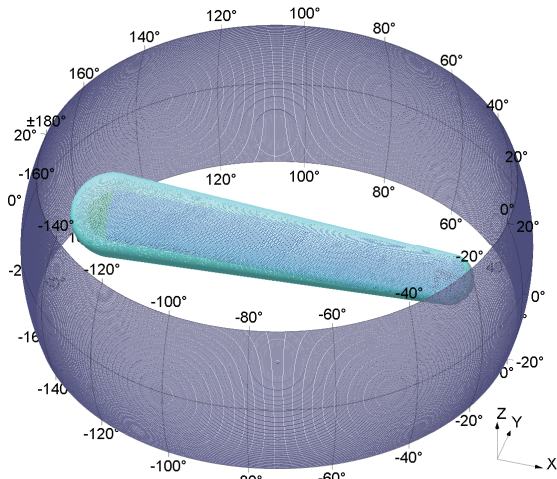


Abb. 5: Projektionsoberfläche, bestehend aus 232.001 Auswertungspunkten, Projektionsdistanz hier: 30 m

Ergebnisse für $f = 10$ kHz

Zunächst wird der monostatische Rückstreuepegel im Fernfeld (Distanz bzw. Radius der Abbildungsfläche: 10 km. Endwerte normiert auf eine Distanz von 1 m) an allen 232.001 Auswertungspunkten für die benötigte Frequenz mittels des Raytracing-Verfahrens ermittelt (auch dies wäre mit konventionellen BE-Methoden derzeit nicht in vertretbarer Zeit machbar).

Damit ergibt sich z.B. für eine Frequenz $f = 10$ kHz der in Abb. 6 gezeigte Verlauf.

Hinweis: Zur Übersichtlichkeit wurde in den folgenden Abbildungen der Außenzylinder ausgeblendet.

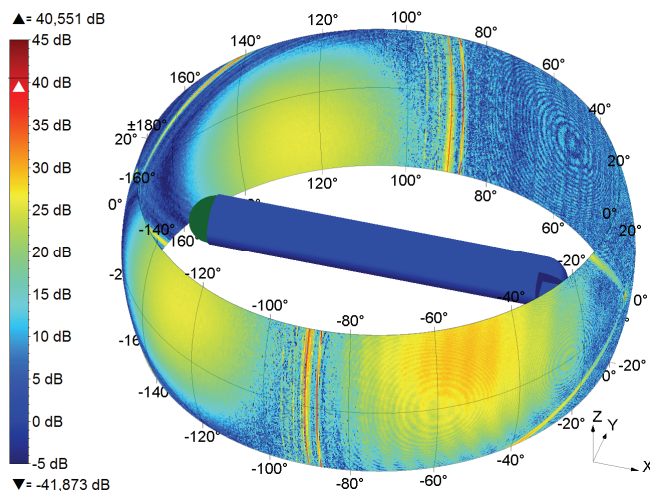


Abb. 6: Normalisierter Rückstreuepegel für $f = 10$ kHz

Da das Ergebnis für eine einzelne Frequenz deutlich erkennbare Interferenzmuster aufweist, die sich aufgrund der Eigenarten des Raytracing-Verfahrens ergeben, wurde zu

deren Minimierung eine Mittelung über einen passenden Frequenzbereich (hier: 8 ... 12 kHz in 0,2 kHz Schritten = 21 Frequenzen mit $f_{\text{aver}} = 10$ kHz) durchgeführt (Abb. 7).

Dies entspricht auch eher der Praxis, bei der i.d.R. Ping-Signale mit einem definierten Frequenzbereich („Sweep“) eingesetzt werden.

Das BEAM-Verfahren unterstützt derartige Frequenzsweeps durch entsprechende interne Optimierung, da bei konstanter Schallquellenposition nur die reflektierten bzw. transmittierten Anteile pro Strahl neu ermittelt werden müssen.

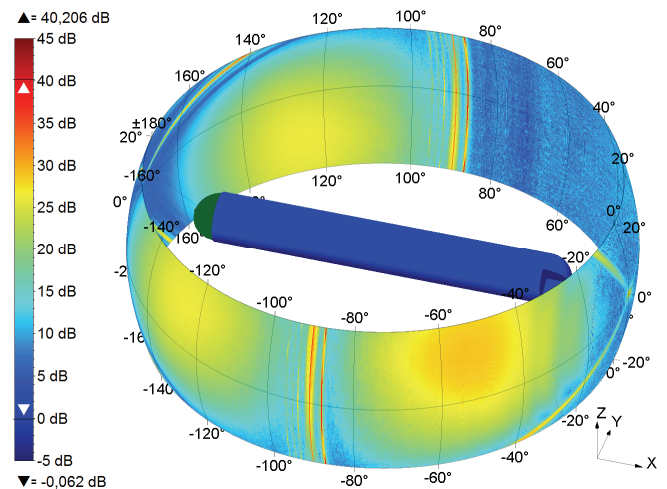


Abb. 7: Gemittelter Rückstreuepegel aus $N_f = 21$ Frequenzen für $f_{\text{aver}} = 10$ kHz

Mit Hilfe dieser Ergebnisse (Abb. 8) lassen sich deutlich die Auswirkungen der Tripelspiegel (rote Pfeile) und die der zugehörigen Doppelspiegel (violette Pfeile) des Innenzylinders erkennen, ebenso wie die Drehung um 30° um die X-Achse.

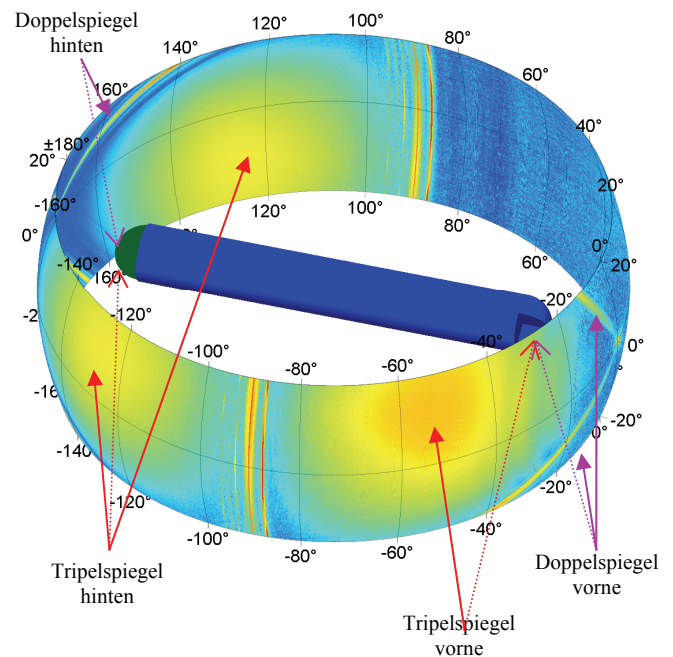


Abb. 8: Kennzeichnung der Spiegeleffekte
Tripelspiegel: rot (gepunktet: „Quellort“),
Doppelspiegel: violett (gepunktet: „Quellort“)

Die Rechenzeiten für die o.a. Berechnungen lagen bei ca. 11 h, was einem Rechenaufwand von ca. 0,17 s pro Auswertungspunkt (für jeweils 21 Frequenzen) entspricht.

Ergebnis für $f = 1$ kHz

Zum Vergleich soll das Ergebnis an diesem Modell für eine mittlere Frequenz von $f_{\text{aver}} = 1$ kHz ermittelt werden, ebenfalls durch eine Mittelung über 21 Frequenzen ($f = 0,9 \dots 1,1$ kHz, $\Delta f = 10$ Hz). Aufgrund des niedrigeren Frequenzbereichs ist eine deutliche Reduktion des Rückstreupiegels zu erwarten.

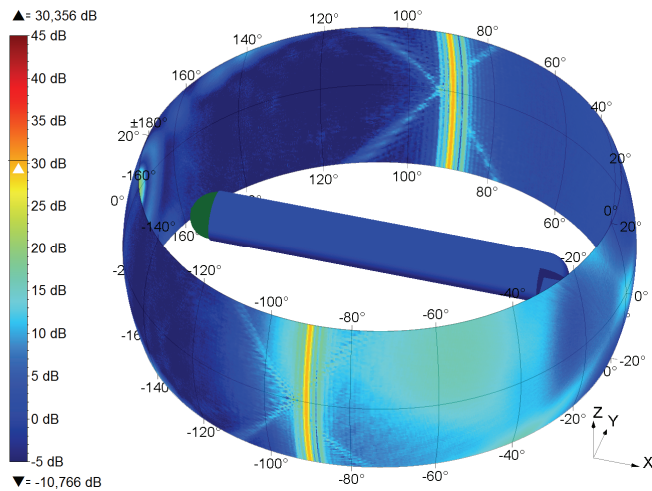


Abb. 9: Gemittelter Rückstreupiegel aus $N_f = 21$ Frequenzen für $f_{\text{aver}} = 1$ kHz

Das Ergebnis (Abb. 9) zeigt, bei gleicher Farbskalierung wie Abb. 7, die erwartete Reduktion, insbesondere liefern die hinteren Tripelspiegel kein erkennbares Muster mehr und werden quasi „transparent“.

Ermittlung der „Hotspots“ für $f = 10$ kHz

Das Ergebnis für $f_{\text{aver}} = 10$ kHz aus Abb. 7 lässt sich auch in einer 2D-Abwicklung (Abb. 10) darstellen.

In diesem Modus kann ein Evaluierungspunkt mit besonders hoher Rückstrahlung (z.B. am Längengrad $\lambda_L = -53^\circ$ und Breitengrad $\phi_B = 15^\circ$, vorderer Tripelspiegel) ausgewählt werden, für den ermittelt werden soll, welche Bereiche der inneren Struktur für den dessen hohen Rückstreuteil verantwortlich sind.

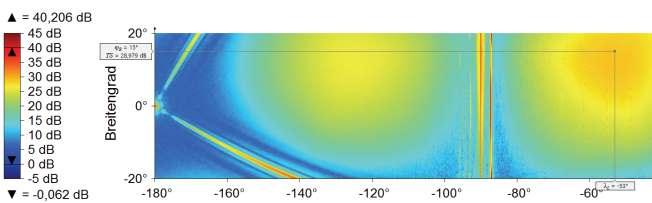


Abb. 10: Gemittelter Rückstreupiegel für $f_{\text{aver}} = 10$ kHz, 2D-Abwicklung (Ausschnitt)

Eine spezielle Rechnung mit dem BEAM-Verfahren „merkt“ sich zunächst alle verwendeten Strahlen. Mittels speziellen einer Integrations- und Filterfunktion werden dann die Druckanteile der einzelnen Strahlen auf den „Kacheln“ einer Projektionsebene berechnet und daraus die „Hotspots“ ermittelt (Abb. 11).

Dabei können die relevanten Strahlen und Elemente visualisiert werden. So ist in Abb. 11 der vordere Tripelspiegel als „Verursacher“ deutlich erkennbar.

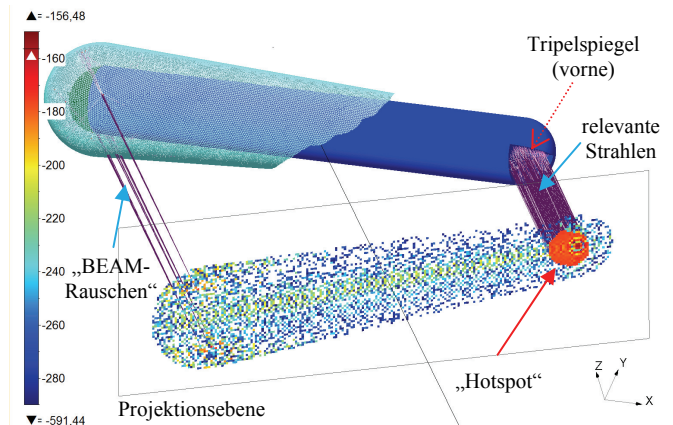


Abb. 11: Ermittlung der „Hotspots“ durch Integration der Strahl-Anteile mit Filterung (Außenhülle nur z.T. dargestellt)

Wird der relevante Bereich des vorderen Tripelspiegels verändert, z.B. durch Aufbringen einer absorbierenden Schicht auf einer Seite (violette Markierung), so ist eine Verringerung des Rückstreupiegels zu erwarten.

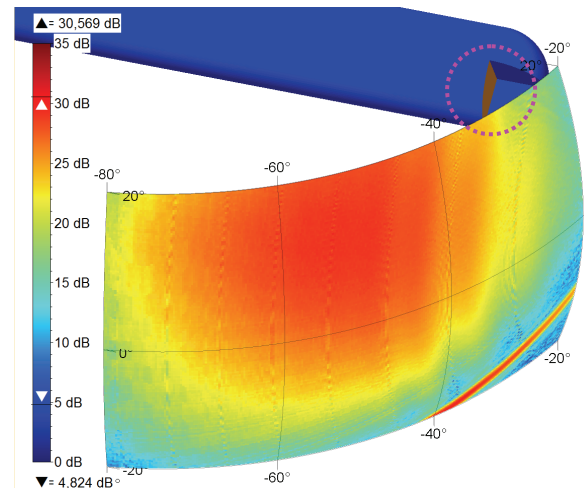


Abb. 12: Gemittelter Rückstreupiegel für $f_{\text{aver}} = 10$ kHz im Bereich des vorderen Tripelspiegels ohne Absorption

Abb. 12 zeigt den betreffenden Ausschnitt ohne Veränderung des Tripelspiegels, während Abb. 13 denselben Ausschnitt nach Aufbringung eines absorbierenden Materials auf der senkrechten Spiegelfläche darstellt.

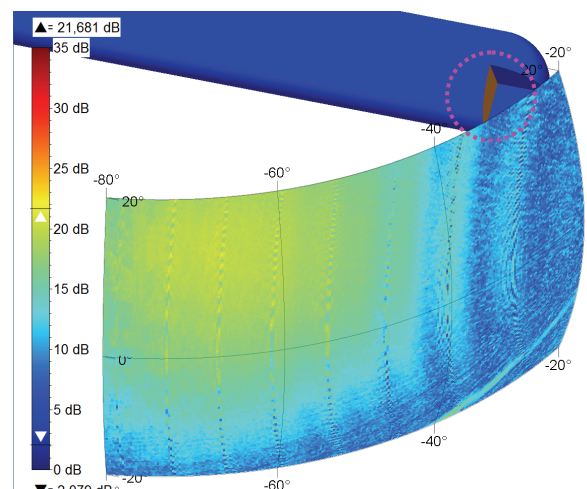


Abb. 13: Gemittelter Rückstreupiegel für $f_{\text{aver}} = 10$ kHz im Bereich des vorderen Tripelspiegels mit Absorption an der senkrechten Spiegelfläche (braun)

Die Reduktion des Rückstreupegels um ca. 9 dB aufgrund des absorbierenden Oberflächenanteils ist deutlich erkennbar.

Zusammenfassung und Ausblick

Die erzielten Resultate zeigen die grundsätzliche Verwendbarkeit des Verfahrens zur Ermittlung pegelrelevanter Bereiche für innenliegende und ggf. teilverdeckter Strukturen.

Der Vorteil liegt in der hohen Geschwindigkeit bei monostatischen Berechnungen für mehrere Frequenzen und in der Möglichkeit, Bereiche mit mehrfachen Reflexionen sowie dünne Schichten berücksichtigen zu können. Allerdings kann das Verfahren nur für Betrachtungen im Fernfeld eingesetzt werden, da es keine oberflächenspezifischen Werte liefert.

Das Verfahren muss insbesondere noch an komplexeren Innenstrukturen, z.B. Wänden oder Rohren, getestet werden, ebenso ist die Option zur Visualisierung der pegelrelevanten Bereiche noch nicht vollständig implementiert.

Auch sind weitere Untersuchungen zur Optimierung hinsichtlich der Performance Gegenstand der aktuellen Forschungstätigkeit (z.B. mittels GPUs).

Literatur

- [1] Brekhovskikh, L.M.: Waves in Layered Media, Academic Press, N.Y. 1960
- [2] Wittek, G.: Schalltransmission bei Platten und ebenen Schichtstrukturen, ATLAS Elektronik GmbH, Bremen, 2006
- [3] I. Schäfer, R. Burgschweiger und B. Nolte: „BEAM Teil I: Mathematisch-physikalische Grundlagen eines strahlenbasierten Lösers zur approximativen Ermittlung der Schallrückstreuung dünnwandiger Objekte“, DAGA 2014, Oldenburg, Deutschland
- [4] R. Burgschweiger, I. Schäfer, M. Ochmann und B. Nolte: „BEAM, Teil II: Implementierung und Ergebnisse“, DAGA 2014, Oldenburg, Deutschland
- [5] B. Nolte, I. Schäfer, C. de Jong und L. Gilroy: „BeTSSi II Benchmark on Target Strength Simulation“, Proceedings of Forum Acusticum 2014, auf CD, Krakau, Polen