

Berichte aus der Akustik

**Daniel Dreyer**

**Efficient Infinite Elements  
for Exterior Acoustics**

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3500-0

ISSN 1611-1303

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Efficient Infinite Elements for Exterior Acoustics

by Daniel Dreyer

The numerical prediction of vibrations, especially of the air or water surrounding structures like vehicles, ships, submarines, or machines in general is of increasing importance. Industries as diverse as the construction, automotive, ship-building or offshore industry employ numerical methods that predict such vibrations for the development of new products. Especially in the lower- and mid-frequency range for exterior acoustics simulations, the so-called Boundary Element Method (BEM) is already in use. This method is known to offer high accuracy, while the stability for transient phenomena and the overall efficiency is not truly satisfying. Especially the deficiencies of the method in the time domain is yet more pronounced, since the simulation of nonlinear effects is strongly gaining importance. For example, the simulation of nonlinearities using the Finite Element Method (FEM) is already a widely adopted approach in today's design and development processes. But also the certainly time-consuming solution of dense systems of equations arising in the BEM is hindering the widespread adoption of this method.

Alternative concepts to simulate unbounded domains, based on the FEM, are dating back to the beginning of the seventies. Such concepts are commonly denoted infinite elements. Various formulations of such elements have been developed, of which the so-called Astley-Leis formulation appears to be the most promising one. While this formulation already offers several advantages over its competitors, still certain deficiencies in the formulation are apparent, namely the stability of transient simulations, and the numerical efficiency at all.

Based on the Astley-Leis formulation, improved infinite elements have been developed in the course of this thesis. The elements were modified, so that they improve or even enable the applicability, efficiency and robustness of modern iterative solution methods. A multitude of numerical examples have been performed, which verify the extreme efficiency of the improved infinite elements. Through the new elements, the simulation of highly complex radiating structures may now be performed with significant performance gains and remarkable scaling, especially on distributed compute servers. But also small-scale numerical simulations may be performed with certainly high efficiency.

The improved infinite elements have been contributed to an open source FEM software library, so that the new concept is publicly available, and may be scrutinized in detail. Direct comparisons of typical simulations with a commercial BEM software reveal overall timings that are reduced by a factor of two to four using the improved formulation. This performance gain is likely to grow even further with increasing problem size.

Additional improvements of the Astley-Leis formulation have been developed, that stabilize the simulation of transient phenomena, or may even enable such simulations at all. With a similar approach, also the accuracy of the infinite elements could be increased. Both of these modifications may directly be combined with the improved infinite elements described before, so that the stability for transient simulations and the increased accuracy may be combined with the efficiency of the improved formulation.

# Effiziente halbunendliche Finite Elemente für Außenraumakustik

von Daniel Dreyer

Für die Entwicklung und den Entwurf von Maschinen, Fahrzeugen und Bauten ist die Schwingungsvorhersage, gerade auch für die umgebende Luft bzw. das umgebende Wasser, von großer Bedeutung. Verschiedenste Industrien, wie z. B. das Bauwesen, die Meerestechnik, der Automobil-, Bahn- und Motorenbau stützen sich auf die numerische Vorhersage akustischer Phänomene bei der Entwicklung neuer Produkte. Insbesondere für den unteren bis mittleren Frequenzbereich werden bereits seit längerer Zeit die sogenannten Randlelementemethoden (BEM) erfolgreich eingesetzt. Während die Genauigkeit dieser Methode sehr hoch ist, läßt die Effizienz im Allgemeinen, und die Robustheit bei transienten Phänomenen hingegen sehr zu wünschen übrig. Das Versagen im Zeitbereich ist um so gravierender, als dass heutige Simulationsmethoden immer stärker auch zur Vorhersage erheblich nichtlinearer, und damit gezwungenermaßen zeitabhängiger Vorgänge genutzt werden. Aber auch gerade die äußerst zeitintensive Lösung vollbesetzter Randlelemente-Gleichungssysteme behindert die Anwendbarkeit dieser Methode erheblich.

Bereits seit Anfang der siebziger Jahre wird versucht, alternative Methoden zur Simulation von Außenraumakustik, basierend auf der bekannten Finite Elemente Methode (FEM), zu entwickeln. Von diesen sogenannten halbunendlichen Finiten Elementen zeichnet sich insbesondere die Astley-Leis Formulierung als vielversprechender Kandidat aus. Während diese Elemente zwar bereits einige Vorteile gegenüber anderen Ansätzen aufweisen können, so ist aber die Stabilität bei transienten Simulationen, und insbesondere die Effizienz der Elemente bei weitem noch nicht zufriedenstellend. Aufbauend auf dieser Formulierung wurden im Verlauf dieser Dissertation verbesserte halbunendliche Elemente entwickelt. Diese Elemente wurden derart modifiziert, dass sie die Anwendbarkeit, Effizienz und Robustheit moderner iterativer Lösungsverfahren erheblich unterstützen bzw. erst ermöglichen. Umfangreiche Simulationen wurden durchgeführt, welche die hervorragende Effizienz der neuen Elemente nachweisen. So ermöglicht die neue Formulierung die Simulation akustischer Außenraumphänomene großer Strukturen mit hohem Komplexitätsgrad auch auf verteilten Rechnern mit großer Effizienz und Skalierbarkeit. Aber auch kleine Berechnungen werden mit äußerst geringem Zeitaufwand simuliert.

Die verbesserten Elemente wurden in eine freie Software-Bibliothek integriert, damit die stabile und effiziente Simulation von Außenraumakustik der Öffentlichkeit zugänglich ist. Direkte Vergleiche mit etablierter kommerzieller Randlelemente-Simulationssoftware weisen echte Zeitersparnisse um den Faktor zwei bis vier für typische Anwendungsfälle auf. Diese Verringerung der Rechenzeit wird für größere Diskretisierungen voraussichtlich noch weiter steigen.

Zusätzliche Verbesserungen der zugrundeliegenden Formulierung wurden entwickelt, welche die Simulation transienter Phänomene stabilisiert, und damit teilweise erst ermöglicht. In ähnlicher Weise konnte auch die Genauigkeit der Elemente unter bestimmten Voraussetzungen verbessert werden. Diese beiden letztgenannten Modifikationen sind direkt mit den verbesserten halbunendlichen Finiten Elementen kombinierbar, so dass die erhöhte Genauigkeit und Stabilität für transiente Simulationen mit der extremen Verringerung der Rechenzeiten kombiniert werden kann.