

Lehrstuhl für Bauinformatik  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
Technische Universität München

**Strömungsakustik und Fluid-Struktur-Kopplung mit der  
Lattice-Boltzmann- und der Finite-Element-Methode**

Barbara Neuhierl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. techn. R. Lackner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. E. Rank
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. G. H. Müller
3. Hon.-Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. hc. A. Gilg

Die Dissertation wurde am 31.10.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 06.02.2008 angenommen.



Berichte aus der Bauinformatik

**Barbara Neuhierl**

**Strömungsakustik und Fluid-Struktur-Kopplung  
mit der Lattice-Boltzmann- und der  
Finite-Element-Methode**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7170-1

ISSN 1612-6262

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

## Zusammenfassung

Die numerische Strömungsakustik ist ein relativ junges, ingenieurwissenschaftliches Entwicklungs- und Forschungsgebiet und beschäftigt sich mit der Abbildung von Schall, der durch Strömungsvorgänge verursacht wird. Als typische Anwendungsbereiche können – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – die Luftfahrt, der Hochgeschwindigkeits-Schienerverkehr, Strömungen durch Rohrleitungen und HVAC<sup>1</sup>-Systeme oder auch Geräte, in denen Lüfter zum Einsatz kommen, genannt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zunächst die Eignung der Lattice-Boltzmann-Methode zur simultanen Simulation von transienten Strömungsvorgängen und Druckausbreitung demonstriert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Auflösung von solchen Druck- bzw. Dichteschwankungen, die typischerweise akustische Vorgänge repräsentieren, gelegt.

Im Fluid liegende oder das Fluid umschließende, vibrierende Strukturen können zusätzlichen Schall hervorrufen oder zu gekoppelten Phänomenen führen. Um diese Einflüsse zu berücksichtigen, wurde ein partitionierter Ansatz zur Fluid-Struktur-Kopplung implementiert. Das Strukturproblem wird dabei durch die Methode der Finiten Elemente abgebildet.

Sowohl beim Strömungscode als auch beim Finite-Element-Programm wird auf kommerzielle Software zurückgegriffen. Die verwendeten Programme sind EXA POWERFLOW auf der Strömungs- und ANSYS auf der Strukturseite. Beide sind in einen Rahmenalgorithmus eingebunden, der auch den Datenaustausch über entsprechende Schnittstellen sowie die Zeitschrittsteuerung übernimmt und damit die Simulation der Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur ermöglicht.

Um den vorgestellten Ansatz zu validieren, werden Simulationen an einfachen Modellen wie umströmten Zylindern und Profilen untersucht, deren Ergebnisse bekannt sind. Um die Eignung der Methode für komplexere Problemstellungen zu demonstrieren, wird ein weiteres Beispiel aus der Industrie vorgestellt, bei dem vergleichbare Effekte auftreten.

## Abstract

Computational aeroacoustics is a relatively young field of engineering research and development and deals with the representation of sound generated by fluid flow. Characteristic application domains are – just to mention a few – the area of aviation and railway, internal flows in pipes and HVAC systems, or even consumer products and household devices, where aerodynamic sound is generated e.g. by fans.

Within this thesis, first of all the suitability of the Lattice-Boltzmann-Method for simultaneous simulation of transient flows and wave propagation is demonstrated. In particular, the resolution of pressure and density fluctuations representing acoustic phenomena is of interest.

Vibrating structures that lie within or enclose the fluid might cause further sound or lead to coupled phenomena. In order to take into account this influences, a par-

---

<sup>1</sup>HVAC: *Heating, Ventilation, Air Conditioning*

tioned approach for fluid-structure interaction was implemented. The structure problem is represented using the Finite-Element-Method.

For both the CFD- and the Finite-Element-Code commercially available software was used. The programs applied are EXA POWERFLOW on the fluid and ANSYS on the structure side. Both are embedded in a framework algorithm that also controls the data exchange via adequate interfaces, thus enabling the simulation of the interaction between fluid and structure.

In order to validate the presented approach, simulations of simple models with well-known results like the flow around cylinders or other profiles are documented. Finally, to show the method's suitability to more complex problems, a further, industrially relevant example leading to similar effects is shown.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde parallel zu meiner Berufstätigkeit bei der *Corporate Technology* der Siemens AG in München erstellt.

An allererster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Hrn. Prof. Dr. Rank für die großartige und engagierte Betreuung der Arbeit und die vielen fruchtbaren Diskussionen danken.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Bauinformatik der Technischen Universität München danke ich für das freundliche Klima und ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft.

Hrn. Prof. Dr. Müller und Hrn. Prof. Dr. Gilg danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie Hrn. Prof. Dr. Lackner für die Leitung der Prüfungskommission.

Ferner möchte ich den Verantwortlichen bei der Siemens AG, Hrn. Prof. Dr. Gilg, Hrn. Dr. Nottbeck und Hrn. Keil dafür danken, dass sie es mir ermöglichten, be-rufsbegleitend die vorliegende Dissertation anzufertigen.

Der Firma EXA GmbH, die das Softwarepaket POWERFLOW zu Hochschulkonditionen zur Verfügung stellte, möchte ich an dieser Stelle Dank für ihre Kooperationsbereitschaft aussprechen.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Albrecht für seine Geduld und Unterstützung.

München, Februar 2008

Barbara Neuhierl





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Schallerzeugung durch Strömungsvorgänge . . . . .	1
1.2	Wirkung von Schall auf Mensch und Umwelt . . . . .	1
1.3	Entstehungsmechanismen von Strömungs- lärm . . . . .	2
1.4	Simulationsmethoden . . . . .	3
1.5	Ziele der Arbeit . . . . .	4
1.6	Inhaltliche Übersicht . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Die Grundgleichungen der Strömungsmechanik</b>	<b>7</b>
2.1	Das Schallfeld als ein Sonderfall der allgemeinen Strömungsbeschrei- bung . . . . .	7
2.2	Kompressible und inkompressible Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	8
2.3	Linearisierung der Gasdynamik . . . . .	9
2.4	Die Wellengleichung . . . . .	11
2.5	Schallwellen in bewegten Fluiden . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Die Reynolds-Gleichungen</b>	<b>15</b>
3.1	Turbulenz in Strömungen . . . . .	15
3.2	Reynolds-gemittelte Gleichungen . . . . .	16
3.3	Das Schließungsproblem der Strömungsmechanik . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Die akustische Analogie nach Lighthill und Fawkes, Williams und Hawkins</b>	<b>21</b>
4.1	Die nichtlineare Wellengleichung . . . . .	21
4.2	Abbildung von Schallquellen durch Elementarquellen (Punktstrahler) . . . . .	22
4.3	Formulierung der Quellterme in der nichtlinearen Wellengleichung . . . . .	25
4.4	Grenzen und Einschränkungen bei Anwen- dung der akustischen Analogie . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Das Finite-Volumen-Verfahren</b>	<b>29</b>
5.1	Simulationsverfahren in der Strömungsmechanik . . . . .	29
5.2	Die Grundgleichungen in Erhaltungsform . . . . .	29
5.3	Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .	31
5.4	Diskretisierung des Strömungsproblems . . . . .	32

5.5	Numerische Lösung des Gleichungssystems . . . . .	33
5.6	Die Berücksichtigung von Turbulenz . . . . .	33
5.6.1	Direkte numerische Simulation . . . . .	33
5.6.2	RANS-Simulation . . . . .	34
5.6.3	Large-Eddy-Simulation . . . . .	34
5.6.4	Turbulenzmodelle . . . . .	36
5.7	Bedeutung für die Aeroakustiksimulation . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Die Boltzmann-Gleichung</b>	<b>41</b>
6.1	Herleitung der Lattice-Boltzmann-Methode aus der statistischen Physik . . . . .	41
6.2	Verteilungsfunktionen als Lösungen der Boltzmann-Gleichung . . . . .	43
6.3	Vereinfachung des Stofterms . . . . .	44
6.4	Chapman-Enskog-Entwicklung . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Die Lattice-Boltzmann-Methode zur Simulation von Strömungen</b>	<b>47</b>
7.1	Die Lattice-Boltzmann-Gleichung . . . . .	47
7.2	Gittermodelle . . . . .	49
7.3	Abbildung von akustischen Eigenschaften . . . . .	52
7.4	Die Berücksichtigung von Randbedingungen bei der Lattice-Boltzmann-Methode . . . . .	53
7.5	Gegenüberstellung von Lattice-Boltzmann-Methode und klassischer CFD . . . . .	57
7.6	Die Behandlung von Turbulenz . . . . .	57
<b>8</b>	<b>Die Methode der Finiten Elemente</b>	<b>61</b>
8.1	Motivation . . . . .	61
8.2	Grundlagen der Kontinuumsmechanik . . . . .	61
8.3	Spezielle Geometrien . . . . .	64
8.4	Diskretisierung und Ansatzfunktionen . . . . .	64
8.5	Approximation durch die FEM . . . . .	65
8.6	Strukturdynamische Problemstellungen . . . . .	67
8.7	Randbedingungen . . . . .	69
<b>9</b>	<b>Verwendete Software</b>	<b>71</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	71
9.2	Das Lattice-Boltzmann-Programm POWERFLOW . . . . .	71
9.3	Das Finite-Element-Programm ANSYS . . . . .	73
9.4	Die Skriptsprache PYTHON . . . . .	74
9.4.1	Skripte in POWERFLOW . . . . .	74
9.4.2	Programmierung des Kopplungsprogrammes . . . . .	75
<b>10</b>	<b>Der umströmte Körper - ein Testfall für die Simulation aeroakustischer Phänomene</b>	<b>77</b>
10.1	Motivation . . . . .	77
10.2	Umströmte kreisrunde Zylinder . . . . .	77

10.3	Strömungsmechanische Phänomene . . . . .	78
10.4	Aeroakustik . . . . .	81
10.5	Umströmte kantige Profile . . . . .	82
<b>11</b>	<b>Simulation aeroakustischer Phänomene</b>	<b>85</b>
11.1	Der 'digitale Windkanal' . . . . .	85
11.2	Messen von Strömungsergebnissen . . . . .	86
11.2.1	Zeitlich gemittelte Ergebnisse . . . . .	86
11.2.2	Ergebnisse ohne zeitliche Mittelung . . . . .	87
11.3	Auswertung von Simulationsergebnissen mit Hilfe der FFT . . . . .	88
11.4	Umströmter Zylinder bei niedrigen Reynolds-zahlen . . . . .	89
11.5	Umströmter Zylinder bei hohen Reynolds-zahlen . . . . .	92
11.6	Simulation mit dem Programm CFX . . . . .	94
<b>12</b>	<b>Fluid-Struktur-Kopplung</b>	<b>97</b>
12.1	Überblick . . . . .	97
12.2	Lösungsverfahren für gekoppelte Probleme . . . . .	97
12.3	Wechselwirkung Fluid-Struktur . . . . .	99
12.3.1	Strömungsfeld und akustisches Feld . . . . .	99
12.3.2	Strömungsfeld und Strukturmechanik . . . . .	99
12.4	Schnittstellen zwischen dem FE- und dem LB-Programm . . . . .	101
12.4.1	Schnittstelle 1: Export von Strömungsdrücken . . . . .	101
12.4.2	Schnittstelle 2: Kopplung Struktur zu Fluid . . . . .	103
12.5	Kopplungsalgorithmus . . . . .	107
12.5.1	Kopplung Strömung zu Struktur . . . . .	107
12.5.2	Kopplung Struktur zu Strömung . . . . .	109
12.5.3	Bidirektionale Kopplung . . . . .	110
<b>13</b>	<b>Simulationsbeispiele, einseitige Kopplung: Fluid <math>\rightarrow</math> Struktur</b>	<b>113</b>
13.1	Strömung um einen starren, elastisch gelagerten Zylinder . . . . .	113
13.2	Strömung um einen elastischen, unverschieblich gelagerten Zylinder . . . . .	115
13.3	Strömung um kantige Profile . . . . .	117
13.3.1	Vergleich Zylinder - Balken . . . . .	117
13.3.2	Vergleich von Winkelprofilen mit unterschiedlichen Anströmrichtungen . . . . .	118
<b>14</b>	<b>Simulationsbeispiele, einseitige Kopplung: Struktur <math>\rightarrow</math> Fluid</b>	<b>123</b>
14.1	Umströmte vibrierende Profile . . . . .	123
14.2	Der Lock-in-Effekt . . . . .	127
<b>15</b>	<b>Simulationsbeispiele, bidirektionale Kopplung</b>	<b>131</b>
15.1	Strömung um ein starres, elastisch gelagertes, flächiges Profil . . . . .	131
<b>16</b>	<b>Ein industrielles Anwendungsbeispiel: Stromabnehmer</b>	<b>137</b>

<b>17 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>145</b>
17.1 Zusammenfassung . . . . .	145
17.2 Ausblick . . . . .	146
17.2.1 Formulierung von Randbedingungen . . . . .	146
17.2.2 Schallabstrahlung ins Fernfeld . . . . .	147
17.2.3 Große Strukturverformungen . . . . .	147
17.2.4 Abgleich von Rechenergebnissen mit Messungen . . . . .	147