

Chandramouli Gnanasambandham

**Particle Dampers- Enhancing
Energy Dissipation using
Fluid/Solid Interactions and
Rigid Obstacle-Grids**

SHAKER
VERLAG



Band 68 (2021)

Particle Dampers- Enhancing Energy Dissipation using Fluid/Solid Interactions and Rigid Obstacle-Grids

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Chandramouli Gnanasambandham
aus Chennai, Indien

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E. h Peter Wriggers

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2021

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2021

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 68/2021

Chandramouli Gnanasambandham

**Particle Dampers- Enhancing Energy Dissipation using
Fluid/Solid Interactions and Rigid Obstacle-Grids**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-8171-8

ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preface

It gives me great pleasure to take this opportunity to acknowledge my indebtedness to all those who have helped me in completing the present work.

Firstly, I thank Dr.-Ing. Timo Gaugele for recommending me to Prof. Eberhard. If not for him I could have never done my Ph.D. in such a prestigious institute like the ITM. Secondly and most importantly, I would like to express my deepest gratitude to my doctoral advisor, Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Peter Eberhard. I am grateful to him for providing me the opportunity to do this research under his supervision. Thanks to his excellent subject knowledge and precise communication he pushed me beyond my limits to achieve the best quality in my work. Next, I am greatly honoured to have Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Peter Wriggers as the second reviewer for my thesis. Many thanks to Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Pott for leading the examination committee.

I owe a special thanks to apl. Prof. Dr.-Ing. Jörg Fehr, Dr.-Ing. Pascal Ziegler and our loving secretary Mrs. R. Prommersberger. All of them provided me with a family-like atmosphere and gave me warm-hearted help whenever I needed.

I am very thankful to all the former and present ITM colleagues for the support they have given me. Especially, I would like to thank Florian Fleißner, Florian Beck, Dirk Schnabel and Christian Pfister. Many ideas and impulses that enriched this work came from them. Special thanks to the hard working ITM-network administrators Dennis Grunert, Haoyue Zerbe (geb. Hu), Daniel Sollich, Lorin Kazaz and Fabian Matter.

My research was tremendously influenced and motivated by several talented students: Enrico Messori, Jasmin Krauspenhaar and Siva Mallikarjunan. Especially, I would like to thank my student Andreas Schönle for his cooperation, who has also started to pursue his own doctorate in the field of particle dampers at the ITM.

I thank my parents T. Gnana Sambandham and G. Visalakshi and my brother G. Thenappan for their unconditional love and affection. They gave me the best education one could ever hope for and the freedom to pursue whatever I wanted. I would like to thank my late aunt C. Meena for her support. She lost her life fighting the deadly second COVID-19 wave, which struck India during April 2021. Her modesty and her utmost dedication to work will always be a guiding source of light to me and my family.

Most importantly, I am sincerely grateful to my wife (paapu) for her unconditional love, support and patience during the years I spent on my Ph.D. work.

To my paapu,
Subashree Anandhi Elango

Contents

Zusammenfassung	XI
Abstract	XIII
1 Introduction	1
1.1 Passive Vibration Control	1
1.1.1 Single Particle Impact Dampers	5
1.1.2 Particle Dampers	6
1.2 Objectives of this Research	14
1.3 Thesis Outline	16
2 Lagrangian Particle Methods	19
2.1 Discrete Element Method	20
2.1.1 Normal Contact Forces	20
2.1.2 Tangential Contact Forces	21
2.1.3 Non-Convex Shapes and Rigid Boundaries	22
2.2 Smoothed Particle Hydrodynamics	23
2.2.1 Kernel and Particle Approximation	24
2.2.2 SPH Discretization of the Navier-Stokes Equations	25
2.2.3 Pressure Evaluation	26
2.2.4 Further Extensions and Corrections	26
2.2.5 Modelling Solid Boundaries	28
2.2.6 Turbulence Modelling	30
2.3 SPH-DEM Coupling	36
2.3.1 Application to Free-Surface Flows Containing Solids	37

3	Modelling a Conventional Particle Damper	43
3.1	Ring-Down Experimental Setup	43
3.2	Simulation of a Conventional Particle Damper	47
3.2.1	Generation of Initial Particle Packings	47
3.2.2	Parameter Identification Procedure	48
3.3	Important Factors Influencing the Particle Damper Performance	51
3.3.1	Effect of the Container Length	51
3.3.2	Effect of the Number of Particles	53
3.3.3	Effect of Other Parameters	55
4	Enhancing Dissipation of Particle Dampers by Partially Filling them with a Liquid	57
4.1	Liquid-Filled PD with Spherical Shapes	57
4.1.1	Experimental Results	59
4.1.2	Simulation of Liquid-Filled PDs with Spherical Shapes	60
4.2	Liquid-Filled PD with Non-Convex Shapes	69
4.2.1	Experimental Results	71
4.2.2	Simulation of Liquid-Filled PDs with Non-Convex Shapes	73
4.2.3	Effect of Solid-Liquid Ratio	74
4.2.4	Effect of Solid Particle Density	76
5	Enhancing Dissipation of Particle Dampers using Obstacle-Grids	81
5.1	Forced Response Experimental Setup	83
5.2	Experimental Results	87
5.3	Simulation of PDs with Obstacle-Grid	89
5.4	Influence of Cell-Size on the Dissipation Performance	94
5.5	Efficient Computations Using Periodic Boundaries	95
6	Investigating the Multi Frequency Damping Properties of Particle Dampers	99
6.1	Experimental Setup	100
6.2	Experimental Results	102

6.2.1	Frequency Response of the Host Structure	102
6.2.2	Investigated Damper Configurations	104
6.2.3	Influence of PD on the Host-Structure	105
6.2.4	Particle Damper versus Tuned Mass Damper	108
6.2.5	Towards Quantifying Broadband Dissipation	109
6.2.6	Concluding Recommendations and Remarks	111
7	Summary and Outlook	113
	Symbols	117
	Literature	119

Zusammenfassung

Der Einsatz von Partikeldämpfern (PD) stellt eine vielversprechende Alternative zur Schwingungsbeeinflussung dar. Im Gegensatz zu konventionellen Dämpfern bieten PD viele Vorteile wie einfache Konstruktion, Einsatz über ein großes Frequenzspektrum und die Übernahme zusätzlicher Funktionen wie Geräuschminderung oder tragende Funktion. Die Energiedissipation eines PD ist dabei abhängig von einer Vielzahl an Parametern wie z.B. Schwingungsfrequenz und -amplitude, Partikelfüllgrad, Material und Form der verwendeten Feststoffpartikel und Reibung. Um PD robust zur Reduktion unerwünschter Schwingungen in technischen Systemen einzusetzen, ist ein tiefgreifendes Verständnis der zugrunde liegenden Dissipationsmechanismen notwendig.

Erstes Ziel dieser Arbeit ist es, ein Simulationsmodell mit Lagrange'schen Partikelmethoden zu entwickeln, um die zugrundeliegenden Dissipationsmechanismen durch entsprechend validierte hybride Simulationen besser zu verstehen. Fokussiert wird dabei auf die prädiktive Analyse und Optimierung von PD.

Ein Nachteil eines PD ist, dass die Energiedissipation sehr empfindlich gegenüber der Anregungsamplitude ist. Konkret ergeben sich bei kleiner Anregungsamplitude lediglich geringe Relativbewegungen der Füllpartikel, wodurch das Dämpfungsvermögen stark abfällt. Um das Dämpfungsvermögen von PD bei kleinen Anregungsamplituden zu erhöhen, sind konstruktive Maßnahmen zur gezielten Erhöhung der Relativbewegung zwischen den Partikeln notwendig.

In dieser Arbeit werden zwei Maßnahmen zur Verbesserung der Energiedissipation in PD verfolgt. Eine Möglichkeit, um die Energiedissipation zu erhöhen, besteht darin, die PD teilweise mit einer Flüssigkeit zu füllen. Um den Einfluss von Parameteränderungen besser quantifizieren zu können, werden Experimente und Simulationen durchgeführt. In der Simulation wird die Fluidbewegung mit der Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Methode und die Festkörperbewegung durch die Discrete Element Method (DEM) modelliert. Experimentelle und Simulationsergebnisse zeigen, dass das Dissipationsverhalten eines hydraulischen PD im Vergleich zu einem rein flüssigkeitsgefüllten Dämpfer oder einem herkömmlichen PD deutlich besser ist. Hiefür gibt es zwei Gründe. Zum einen hilft die Flüssigkeit den Feststoffpartikeln, auch bei kleinen Schwingungsamplituden in Bewegung zu bleiben, was zu mehr Relativbewegung und damit zu mehr Energiedissipation führt. Zum anderen wirken die Festkörperpartikel als effektive Hindernisse für die Schwappbewegungen der Flüssigkeit, welche wiederum zu Energiedissipation führen. Zusätzlich wird der Effekt von nicht-konvexen Partikelformen im Kontext eines teilweise flüssigkeitsgefüllten PD untersucht. Zu diesem Zweck wird die Tetrapodenform mit der Kugelform verglichen. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse zeigen, dass der flüssigkeitsgefüllte PD mit nicht-konvexen Tetrapodenformen eine bessere Dämpfungsleistung aufweist als der PD mit sphärischen Formen.

Eine weitere in dieser Arbeit verfolgte Möglichkeit zur Erhöhung der Energiedissipation beruht auf der Einbringung komplexer 3D-Hindernisststrukturen im PD-Hohlraum. Um die dissipativen Effekte von solchen 3D-Hindernisststrukturen in PD zu untersuchen, werden sowohl Simulationen als auch Experimente durchgeführt. Zur Modellierung der hier relevanten Effekte wird ein effizientes Bounding Volume Hierarchie (BVH) basierendes Kontakterkennungsschema benutzt. Mit der Einbeziehung solcher Hindernisststrukturen ist nachgewiesen, dass die Relativbewegung zwischen den Teilchen erheblich gesteigert wird, was zu einer erhöhten Energiedissipation führt. Die numerischen Ergebnisse zeigen, dass Partikel, die sonst kaum zur Energiedissipation beitragen würden, durch ein Hindernisgitter gezwungen werden sich zu bewegen und somit aktiv am Energiedissipationsprozess teilnehmen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung eines PD auf eine technische Rahmenstruktur. Im Fokus steht dabei, die Mehrfrequenz-Dämpfungseigenschaften von PD zu analysieren. Die Mehrfrequenz Anwendbarkeit von PD wird zwar in der Literatur oft erwähnt, ist aber noch nicht zufriedenstellend untersucht. Zu diesem Zweck wird eine mit einem PD ausgestattete schwach gedämpfte Struktur betrachtet. Diese zeigt mehrere Schwingungsmoden zwischen 30-200 Hz. Um die breitbandige Dämpfung besser veranschaulichen zu können, wird in einem weiteren Schritt das Dämpfungsverhalten eines konventionellen Schwingungstilgers gegen einen PD verglichen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass der Schwingungstilger zu einer signifikanten Reduktion von Schwingungen in der Nähe der Auslegungsfrequenz führt. Allerdings verändert er den Frequenzgang der Trägerstruktur bei anderen Frequenzen drastisch. Im Gegensatz hierzu bieten PD eine erhebliche Schwingungsdämpfung, nicht nur bei der Auslegungsfrequenz, sondern auch bei Frequenzen, die weit über der Auslegungsfrequenz liegen. Schließlich werden auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse Kennzahlen zur Quantifizierung der breitbandigen Dämpfung eingeführt. Solche Kennzahlen können dabei helfen, zusätzliche Erkenntnisse zur Charakterisierung und Optimierung der Leistung von PD zu liefern.

Abstract

Particle dampers (PDs) are a promising alternative to conventional damping devices, due to their simple design and their flexible ability to dissipate energy over a wide range of frequency. The damping performance of a PD is controlled, in a nontrivial way, by various parameters, particle size, shape and material, fill-ratio, inter particle friction, excitation frequency and amplitude, enclosure geometry among others. To robustly apply PDs to reduce unwanted vibrations in technical systems, an in-depth understanding of the underlying dissipation mechanisms is necessary.

First objective of this thesis is to develop a simulation model with Lagrangian particle methods to better understand the underlying dissipation mechanisms using appropriately validated hybrid simulations, with the goal of predictive analysis and optimization of PDs.

One of the disadvantages of conventional PDs is, that their efficiency is highly dependent on the forcing function. Especially, low vibration amplitudes lower the degree of relative motion between the particles, which leads to a strong decrease in the energy dissipation performance of PDs. In order to increase the low amplitude damping performance of PDs, constructive measures to deliberately increase relative motion between the particles are necessary.

In this thesis, two strategies to enhance energy dissipation in PDs are pursued. Firstly, the possibility of partially filling the PD container with a liquid to increase the low amplitude damping performance is explored. To better quantify the influence of parameter changes, simulation and experiments are conducted. The liquid motion is modelled using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method and the discrete element method (DEM) is used to model the motion of the solid particles. Experimental and simulation results show that dampers with a combination of solid and liquid filling exhibit enhanced energy dissipation than purely solid-filled or purely liquid-filled dampers, particularly under low excitation amplitudes. The reason for this is twofold: Firstly, the presence of a liquid aids the solid particles to remain agile even under low vibration amplitudes, leading to more relative motion and thereby leading to more energy dissipation. Secondly, the solid particles act as effective barriers to the liquid sloshing motion. This in turn leads to more shearing of liquid layers and causes increased energy dissipation. Moreover, the effect of non-convex particle shapes in the context of a partially liquid-filled PD is investigated. For this purpose, the tetrapod shape is compared to the spherical shape. The results show, that the liquid filled PD with non-convex tetrapod shapes has superior performance than a PD with particles of spherical shapes.

The second enhancement strategy pursued in this thesis involves the introduction of an 3D obstacle-grid in PDs. To understand the dissipative effects of a 3D obstacle-grid in PDs both simulations and experiments are conducted. The forced vibration experimental setup consists of a shaker used to excite, via elastic elements, a clamped beam on which

a PD with an obstacle-grid is mounted. The obstacle-grid used in the experiments is manufactured using a Stereolithography 3D printer. On the simulation side, the DEM is used to model the interaction between solid particles and their surroundings. Moreover, the rigid obstacle grid is modelled using triangular meshes and to speed up the collision detection process, efficient bounding volume hierarchy data structures are used. A good agreement between simulations and experiments is observed. Moreover, the damping performance of a PD with a rigid obstacle-grid is observed to be at least twice as good as a PD without an obstacle-grid. Simulation results show that particles that would have otherwise been hardly contributing to energy dissipation, move violently due to an obstacle-grid, and hence actively participate in the energy dissipation process.

Yet another objective of this thesis is to apply a PD to a technical frame structure with the focus of analysing the multi frequency damping properties of PDs. The broadband damping property of a PD is frequently mentioned in the literature, but has not yet been satisfactorily understood. For this purpose, a forced vibration test rig is set up where a PD is applied to a weakly damped frame structure, which exhibits multiple vibration modes. To get a deeper insight into the broadband damping properties, the performance of the PD is compared to a conventional tuned mass damper (TMD). The experimental results show that the TMD, even though it does an extremely good job in reducing vibration near the design frequency of 60 Hz, drastically alters the frequency response of the host structure. On the other hand, PDs provide considerable vibration damping not only at the design frequency but also at multiple frequencies far higher than the design frequency. Finally based on the insights gained, performance metrics are introduced to quantify broadband damping. The broadband damping metrics is expected to provide additional information to designers for characterizing and optimizing the performance of PDs.