



Aachener Berichte aus dem Leichtbau

# A coupled structural and economical design procedure for shell structures

Pawel Lyssakow



Institut für  
Strukturmechanik  
und Leichtbau

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

# **A COUPLED STRUCTURAL AND ECONOMICAL DESIGN PROCEDURE FOR SHELL STRUCTURES**

**EIN MECHANISCH-ÖKONOMISCH GEKOPPELTES  
AUSLEGUNGSVERFAHREN FÜR SCHALENSTRUKTUREN**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule  
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Pawel Lyssakow**

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer

Tag der mündlichen Prüfung: 04. März 2021

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar



Aachener Berichte aus dem Leichtbau  
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 1/2021

**Pawel Lyssakow**

**A coupled structural and economical  
design procedure for shell structures**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-7989-0

ISSN 2509-663X

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

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

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

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen University im Zeitraum von April 2016 bis März 2021. Für die vielfältig erfahrene Hilfe möchte ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder, der meine Arbeit stets mit konstruktiven Ideen unterstützt und gefördert hat. Insbesondere möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die persönliche Förderung bedanken.

Für die unkomplizierte Übernahme des Zweitgutachtens und die Unterstützung in der finalen Phase meiner Promotion möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer bedanken. Bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs bedanke ich mich für die Übernahmen des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus gilt mein Dank meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut für die vielen gemeinsamen fachlichen, aber auch fachfremden Diskussionen sowie für die stets große Hilfsbereitschaft. Insbesondere möchte ich meinem ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Linus Friedrich danken, der mich vor allem zu Beginn meiner Zeit am Institut fachlich und persönlich sehr unterstützt hat. Die kollegiale und freundliche Atmosphäre am Institut habe ich sehr zu schätzen gelernt.

Weiterhin möchte ich mich bei den vielen Studierenden bedanken, die mich mit ihren Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten unterstützt haben. Die Betreuung eurer Abschlussarbeiten hat mir sehr viel Freude bereitet. Darüber hinaus habt ihr einen wesentlichen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet.

Mein besonderer Dank gilt schließlich meiner Familie und meinen Freunden, die mich in den letzten Jahren stets unterstützt und ermutigt haben. Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Sarah für das Korrekturlesen meiner Arbeit und insbesondere für die moralische Unterstützung bedanken.

Aachen, März 2021  
Pawel Lyssakow



## Kurzfassung

Die Auslegung von dünnwandigen Schalenstrukturen, wie sie häufig für Trägerraketen verwendet werden, ist seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung. Aufgrund des derzeit zunehmenden Wettbewerbs auf dem Markt für Trägerraketen gewinnt die Kostenreduktion an Relevanz. Um die Kosten für den Nutzlasttransport zu reduzieren, ist es notwendig, die Strukturmasse sowie die Fertigungskosten der Primärstrukturen zu senken.

Schalenstrukturen können imperfektionsempfindlich oder imperfektionstolerant ausgelegt werden. Die Auslegung von imperfektionsempfindlichen Schalenstrukturen stellt eine große Herausforderung dar, da die Imperfektionen, die die Tragfähigkeit dieser Strukturen deutlich reduzieren, zu Beginn des Auslegungsprozesses üblicherweise unbekannt sind. Der Zusammenhang zwischen Fertigungsverfahren und Imperfektionsmuster wird als Fertigungscharakteristik bezeichnet. Ist diese zu Beginn des Auslegungsprozesses bekannt, kann die Tragfähigkeit der Schalenstrukturen vorhergesagt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mechanisch-ökonomisch gekoppelten Auslegungsverfahrens zur Optimierung von Schalenstrukturen hinsichtlich ihrer Strukturmasse sowie ihrer Fertigungskosten. Dafür wird ein Kostenmodell für unversteifte isotrope Schalenstrukturen, gefertigt aus mehreren Paneelen, entwickelt. Mithilfe einer Beispielstruktur werden die Massen- und Kostentreiber untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass es vorteilhaft ist, die Anzahl der Paneele zu reduzieren, da dadurch die Tragfähigkeit der Schale erhöht und gleichzeitig die Fertigungskosten reduziert werden. Weiterhin ist die Verwendung einer hohen Anzahl von Paneelen bei einer hohen Fertigungsgenauigkeit vorteilhaft und umgekehrt. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass das verwendete Fügeverfahren sowie die Größe der Paneele einen hohen Einfluss auf die Fertigungskosten haben. Darüber hinaus beeinflusst die Größe der Paneele die Strukturmasse der Schale deutlich. Schließlich wird ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Paneele und dem Beulmuster abgeleitet.

Um geometrische Imperfektionen und Dickenimperfektionen von Schalenstrukturen zu untersuchen, wird im Rahmen dieser Arbeit die Messvorrichtung SIMS entwickelt. Mithilfe der SIMS werden sechs unversteifte isotrope fließgedrückte Schalen vermessen. Eine Fouriertransformation der Messergebnisse wird durchgeführt. Mithilfe der Imperfektionsmuster, abgeleitet von den zuvor bestimmten Fourier-Koeffizienten, wird die mittlere Fertigungscharakteristik der untersuchten Schalen hergeleitet, die zu einem KDF von  $\rho_{m,PL} = 0.8$  führt. Anschließend wird mithilfe der Messergebnisse der durchschnittliche KDF von  $\rho_{mid-s,\emptyset} = 0.78$  numerisch berechnet und so die Fertigungscharakteristik validiert. Abschließend wird gezeigt, dass der Einfluss der Dickenimperfektionen auf die Tragfähigkeit der Schalen kleiner ist als der der Mittelflächenimperfektionen, jedoch nicht vernachlässigt werden sollte.





## Abstract

Thin-walled shell structures such as those used for space launch vehicles have been the subject of research for many decades. Due to the currently increasing competition on the space launch vehicle market, decreasing the costs per launch is brought to the fore. To reduce launch costs, it is necessary to design structures that are optimized regarding their structural mass and manufacturing costs.

Shell structures can be designed imperfection sensitive or imperfection tolerant. Designing imperfection sensitive shell structures is challenging as the imperfections that drastically reduce the load-carrying capacity of these structures are unknown at the beginning of the design procedure. However, if the manufacturing signature, which is the relation between the manufacturing process and the imperfection pattern, is known at the beginning of the design procedure, it will be possible to predict the load-carrying capacity of the investigated structures.

The goal of this thesis is to develop and introduce a coupled structural and economical design procedure that can be used to design shell structures that are optimized regarding their structural mass and manufacturing costs. Therefore, a cost model for unstiffened isotropic shell structures based on the assembly out of multiple panels is derived. Cost and mass drivers are studied with the help of an example structure. The results show that it is beneficial to reduce the number of panels since in this case the load-carrying capacity increases, while simultaneously the manufacturing costs decrease. However, for a high manufacturing accuracy a high number of panels is beneficial and vice versa. It is shown that the chosen assembly method has a high impact on the manufacturing costs. Furthermore, the available sheet and the required panel sizes have a tremendous impact on the manufacturing costs and on the structural mass of the shell structure. Finally, a relation between the chosen panel combination and the buckling pattern is derived.

The measurement system SIMS, which is capable of measuring geometric and thickness imperfections of cylindrical structures, is developed within this thesis. Afterwards, the SIMS is used to measure the geometric and thickness imperfections of six unstiffened isotropic flow-formed shell structures. A Fourier transformation of the measurement results is carried out. The Fourier coefficient driven imperfection patterns are used to derive the mean manufacturing signature of the investigated structures, leading to a KDF of  $\rho_{m,PL} = 0.8$ . The manufacturing signature is validated with the help of the average KDF of  $\rho_{mid-s,\emptyset} = 0.78$ , which was numerically calculated using the measurement results. Furthermore, it is shown that the impact of thickness imperfections on the load-carrying capacity is smaller than the impact of mid-surface imperfections, but not negligible.



# Contents

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Nomenclature</b>  | <b>xi</b> |
| <b>1 Introduction</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivation . . . . .   | 1         |
| 1.2 State of the art . . . . .   | 5         |
| 1.2.1 Imperfection sensitive shell structures . . . . .  | 5         |
| 1.2.2 Previous imperfection measurement systems . . . . .  | 8         |
| 1.2.3 Estimation of manufacturing costs . . . . .  | 13        |
| 1.3 Objectives and scope of this thesis . . . . .  | 15        |
| <b>2 Theoretical fundamentals</b>  | <b>17</b> |
| 2.1 Buckling and snap-through instability . . . . .  | 17        |
| 2.2 Imperfection sensitivity of thin-walled shell structures . . . . .                                   | 20        |
| 2.3 Manufacturing signature . . . . .  | 22        |
| 2.3.1 Development of the manufacturing signature . . . . .   | 23        |
| 2.3.2 Fourier coefficients . . . . .   | 26        |
| 2.3.3 How to derive the manufacturing signature . . . . .  | 26        |
| 2.3.4 Manufacturing signature used within this thesis . . . . .  | 28        |
| <b>3 Coupled structural and economical design procedure</b>  | <b>29</b> |
| 3.1 Design procedure of unstiffened isotropic shell structures . . . . .                                 | 29        |
| 3.1.1 Manufacturing process and current design procedure . . . . .                                       | 30        |
| 3.1.2 Coupled structural and economical design procedure . . . . .                                       | 32        |
| 3.2 The cost model . . . . .   | 34        |
| 3.2.1 Cost model of unstiffened shell structures . . . . .   | 34        |
| 3.2.2 Material and scrap costs . . . . .   | 36        |
| 3.2.3 Assembly costs . . . . .   | 38        |
| 3.3 Numerical parameter study . . . . .  | 42        |
| 3.3.1 The numerical model . . . . .  | 43        |
| 3.3.2 Example structure and evaluation of the numerical parameter study . . . . .                        | 45        |
| 3.4 Application of the structural and economical design procedure . . . . .                              | 47        |
| 3.4.1 Comparison of different design approaches from a structural and economical point of view . . . . . | 48        |
| 3.4.2 Panel combinations . . . . .   | 50        |
| 3.4.3 Assembly methods . . . . .   | 51        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.5      | Analysis of mass and cost drivers . . . . .   | 52        |
| 3.5.1    | Material costs . . . . .  | 52        |
| 3.5.2    | Scrap costs . . . . .   | 53        |
| 3.5.3    | Assembly costs . . . . .  | 54        |
| 3.6      | Imperfection magnitude and buckling pattern . . . . .                                       | 56        |
| 3.6.1    | Imperfection magnitude . . . . .  | 57        |
| 3.6.2    | Buckling pattern . . . . .  | 58        |
| <b>4</b> | <b>Contactless geometric and thickness imperfection measurement system</b>                  | <b>63</b> |
| 4.1      | Design of the structural imperfection measurement system . . . . .                          | 63        |
| 4.1.1    | Mechanical design of the SIMS . . . . .   | 64        |
| 4.1.2    | Electrical design of the SIMS . . . . .   | 66        |
| 4.1.3    | Measurement and control system . . . . .  | 68        |
| 4.2      | Investigated shell structures . . . . .   | 69        |
| 4.2.1    | The manufacturing process . . . . .   | 69        |
| 4.2.2    | The PL shell structures . . . . .   | 70        |
| 4.3      | Measuring procedure . . . . .   | 72        |
| 4.3.1    | Reference structure . . . . .   | 73        |
| 4.3.2    | Measurement settings . . . . .  | 75        |
| 4.3.3    | Verification of the measurements . . . . .  | 77        |
| 4.3.4    | Error of measurement . . . . .  | 78        |
| 4.4      | The measurements . . . . .  | 80        |
| 4.4.1    | Correction of the eccentricity and the tilt of the longitudinal axis of the shell . . . . . | 81        |
| 4.4.2    | Assembly of the measurement matrices . . . . .  | 83        |
| 4.4.3    | Evaluation of the measurement results . . . . .   | 84        |
| <b>5</b> | <b>Manufacturing signature and imperfection sensitivity of flow-formed shell structures</b> | <b>89</b> |
| 5.1      | Preliminary investigations of the PL shell structures . . . . .                             | 89        |
| 5.1.1    | The numerical model . . . . .   | 90        |
| 5.1.2    | Impact of the conducted corrections on the buckling load . . . . .                          | 90        |
| 5.2      | Manufacturing signature of the PL shell structures . . . . .                                | 92        |
| 5.2.1    | Study of the Fourier coefficients . . . . .   | 92        |
| 5.2.2    | Numerical study of Fourier coefficient driven imperfection patterns . . . . .               | 94        |
| 5.2.3    | Imperfection sensitivities of the PL shell structures . . . . .                             | 96        |
| 5.2.4    | Validation of the derived manufacturing signature . . . . .                                 | 98        |
| 5.3      | Buckling tests . . . . .  | 100       |
| 5.3.1    | The test setup . . . . .  | 100       |
| 5.3.2    | Evaluation of the buckling tests . . . . .  | 100       |
| 5.3.3    | Impact of load imperfections . . . . .  | 104       |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>6 Summary, conclusion and outlook</b>                  | <b>107</b> |
| <b>Bibliography</b>                                       | <b>111</b> |
| <b>A Material prices</b>                                  | <b>123</b> |
| <b>B Imperfection patterns of the PL shell structures</b> | <b>127</b> |
| <b>C Fourier Coefficients of the PL shell structures</b>  | <b>131</b> |