Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 18

Mechanik/
Bruchmechanik

M.Sc. Lars Radtke,
Hamburg

Nr. 353

A partitioned solution approach for fluid-structure interaction problems in the arterial system

https://doi.org/10.51202/9783186353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

A partitioned solution approach for fluid-structure interaction problems in the arterial system

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Lars Radtke

aus

Itzehoe

2020

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Düster

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vorsitzender des Promotionsausschusses
Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried

Erstgutachter
Prof. Dr.-Ing. Alexander Düster

Zweitgutachter
Prof. Dr. med. Eike Sebastian Debus
Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried

Tag der mündlichen Prüfung
11. Juli 2019

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 18

Mechanik/
Bruchmechanik

M.Sc. Lars Radtke,
Hamburg

Nr. 353

A partitioned solution approach for fluid-structure interaction problems in the arterial system

VDI verlag

https://doi.org/10.51202/9783186353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Radtke, Lars
A partitioned solution approach for fluid-structure interaction problems in the arterial system
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 353. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.
298 Seiten, 131 Bilder, 20 Tabellen.
ISBN 978-3-18-335318-7, ISSN 0178-9457,
€ 100,00/VDI-Mitgliederpreis € 90,00.

Keywords: fluid-structure interaction – blood flow – partitioned coupling – high-order finite elements

The present work is concerned with the partitioned solution of the multifield problem arising from a hierarchical modeling approach to cardiovascular fluid-structure interaction. Different strategies to couple the participating field solvers are investigated in detail. This includes staggered and parallel coupling algorithms as well as different methods for convergence acceleration, spatial interpolation and temporal extrapolation of coupling quantities. In the developed modeling and simulation approach, a fully resolved model of a segment of the arterial network is coupled to reduced order models in order to account for the influence of the surrounding.

There is experimental evidence that hemodynamic quantities such as the wall shear stress promote the progression cardiovascular disease. Cardiovascular FSI simulations, that can predict these quantities, are therefore of great interest and can aid in surgical planning and optimization of anastomoses shapes and graft materials.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek
(German National Library)
The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Arbeitsgruppe Numerische Strukturanalyse mit Anwendungen in der Schiffstechnik

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 0178-9457
ISBN 978-3-18-335318-7

https://doi.org/10.51202/9783186353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Acknowledgements

During my work at the Institute for Ship Structural Design and Analysis at Hamburg University of Technology, from which this thesis has emerged, many great people have helped, inspired and encouraged me in one or the other way. I would like to say "thank you" here - without their input, this output would not exist.

First of all, I would like to express my gratitude to my supervisor Prof. Düster. His expertise in a broad range of topics in the field of numerical computation, calmness in explaining and enthusiasm when discussing new ideas have guided me through my first years in academia. Danke dafür! Having started at the same day in the same office, my colleague Marcel König deserves my special thanks as well. His tenacity and skills, which he was always willing to share, have contributed a lot to this thesis. Vielen Dank! Of course, I would like to thank all of my colleague at the institute for their helpfullness the many fruitful discussions. Danke!

Zooming out, I owe great thanks to my parents Christel and Ronald. They have perhaps once sparked my interest in science and support me unconditionally and without exception in everything I do. Danke für alles! I would also like to thank my friends, many of whom have inspired me technically - oftentimes without an engineering background - and all of whom have encouraged me to stay at the university after may Masters degree. Vielen Dank!

Finally, I would express my deepest thanks to my partner Johanna for her everlasting support, comprehension and love. Ich liebe Dich!

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Contents

List of medical terms IX

Abstract X

1 Introduction 1

2 Fluid-structure interaction in the arterial system 6
2.1 The cardiovascular system 7
2.1.1 Anatomy of the larger arteries 8
2.1.2 Physical characteristics of arterial blood flow 10
2.1.3 Cardiovascular diseases 12
2.1.4 Vascular bypass grafts 14
2.2 Computational modeling 16
2.2.1 Fluid-structure interaction 17
2.2.2 Arterial hemodynamics 18

3 Mechanical modeling of the arterial system 23
3.1 Coupled problems 25
3.1.1 Solution approaches 25
3.2 Continuum mechanics 28
3.2.1 Conservation laws on moving domains 29
3.2.2 Structural mechanics 35
3.2.3 Fluid mechanics 45
3.2.4 Interface constraints and domain motion 47
3.3 Mechanical models for the cardiovascular system 50
3.3.1 Constitutive equations for soft tissue 50
3.3.2 Constitutive equations for blood 56
3.3.3 One-dimensional models 58
3.3.4 Windkessel models 61
3.3.5 Models for the surrounding tissue 62
3.3.6 Velocity profiles 64

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3.3.7 Hemodynamic quantities 66

4 Numerical methods 69
4.1 Space and time discretization 70
4.1.1 High-order finite elements for structural mechanics . 70
4.1.2 Finite volumes for fluid mechanics in moving domains 83
4.1.3 Taylor-Galerkin method for one-dimensional blood flow 88
4.1.4 Solvers for ordinary differential equations 90
4.2 Geometry and mesh generation 93
4.2.1 G^1-continuous surface construction 95
4.2.2 Polynomial G^1 PN quads 99
4.2.3 General polynomial G^1 quads 104
4.3 Partitioned solution approach 112
4.3.1 Coupling algorithms 113
4.3.2 Convergence acceleration 117
4.3.3 Predictors 124
4.3.4 Convergence criteria 127
4.3.5 Interpolation 128
4.4 Coupling software 141
4.4.1 Software design 143
4.4.2 Inter process communication 145
4.4.3 Implementation of coupling algorithms 147
4.4.4 Field solver manipulation 147

5 Numerical investigations 153
5.1 Preliminary analyses 153
5.1.1 Structural mechanics 153
5.1.2 Fluid dynamics 168
5.1.3 Reduced models 171
5.1.4 Interpolation 174
5.1.5 Load integration 179
5.2 Coupled benchmark problems 183
5.2.1 Multi-body system 184
5.2.2 Lid-driven cavity flow 199
5.2.3 Two-dimensional flag in channel flow 204
5.2.4 Pulse wave in an elastic tube 208
5.3 Arterial fluid-structure interaction 212
5.3.1 Initial boundary value problem 213

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5.3.2 Coupling algorithm 214
5.3.3 Test case 215
5.3.4 Results 217

6 Applications 220
6.1 Hemodynamics in the scope of vessel geometry and material 220
6.1.1 Decoupled simulations 222
6.1.2 Coupled simulations 225
6.2 Hemodynamics in idealized end-to-side anastomoses 227
6.2.1 Simulation setup 228
6.2.2 Results 230
6.3 Hemodynamics in a patient specific anastomosis 235
6.3.1 Study case 235
6.3.2 Modeling and simulation approach 237
6.3.3 Results – one-dimensional analysis 242
6.3.4 Results – three-dimensional analysis 247
6.3.5 Discussion 251

7 Summary and Outlook 253

Appendix 257
A.1 Tensor algebra 257
A.1.1 Contractions and scalar products 257
A.1.2 Dyadic products of second order tensors 257
A.1.3 Special fourth order tensors 258
A.2 Continuum mechanics 258
A.2.1 Neo-Hookean elasticity tensor 258
A.3 Finite elements 259
A.3.1 Weak form 259
A.3.2 Special matrices 259
A.3.3 Assembly 260
A.3.4 Voigt notation 261
A.3.5 Nodal shape function indices 261
A.3.6 Face and edge coordinates 261
A.4 Taylor-Galerkin method 262
A.4.1 Left-hand side 262
A.4.2 Right-hand side 263
A.5 Radial basis functions 264

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

A.6 Multi body system 264
A.7 Coupling software 266
A.8 Preliminary investigations 266
A.9 Applications 267

Bibliography **269**

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

List of medical terms

abdominal	Refers to the abdomen (stomach)
adventitia	Outermost layer of an arterial wall
anastomosis	Here, connection between bypass graft and artery
aorta	The largest artery in the body
atherosclerosis	Inflammatory disease in arteries
atrium	Smaller chambers of the heart
cardiovascular	Refers to the heart and the circulatory system
coronary	Refers to the heart
diastole	Phase of the cardiac cycle, where blood enters in the left ventricle
distal	Away from the body center, here downstream
dorsal	Refers to the back
endothelium	Layer of cells at the lumen boundary of an artery
erythrocytes	red blood cell
femoral	Refers to the thigh region
iliac	Refers to the intestine region
intima	Innermost layer of an arterial wall
intimal hyperplasia	Abnormal thickening of the intima
leucocytes	White blood cell
media	Middle layer of an arterial wall
proximal	Towards the body center, here upstream
pulmonary	Refers to the lungs
systole	Phase of the cardiac cycle, where blood leaves the left ventricle
thrombocytes	Platelets activating blood clotting
thrombosis	Formation of a blood clot
ventricle	Larger chambers of the heart

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Abstract

The present work is concerned with the partitioned solution of the multifield problem arising from a hierarchical modeling approach to cardiovascular fluid-structure interaction. Different strategies to couple the participating field solvers are investigated in detail. This includes staggered and parallel coupling algorithms as well as different methods for convergence acceleration, spatial interpolation and temporal extrapolation of coupling quantities as well as convergence criteria. In the developed modeling and simulation approach, a fully resolved model of a segment of the arterial network is coupled to reduced order models in order to account for the influence of the surrounding. The resulting problem is solved using five specialized field solvers, namely a fluid and a structural solver for the three-dimensional fluid-structure interaction problem, a one-dimensional blood flow solver for the surrounding vessel network, a solver for different types of windkessel models used to obtain physiological boundary conditions at the distal ends of the one- and three-dimensional models, and a solver for an elastic foundation that describes the surrounding tissue. The applicability of the solution approach is demonstrated in terms of several exemplary applications including studies of idealized and patient specific end-to-side anastomoses of bypass grafts. They are known to be prone to the development of intimal hyperplasia, i.e. a thickening of the vessel wall that may lead to occlusions in the anastomosis region. There is experimental evidence that hemodynamic quantities such as the wall shear stress promote the progression of this secondary disease. Cardiovascular FSI simulation are therefore of great interest and can aid in surgical planning and optimization of anastomoses shapes and graft materials.

https://doi.org/10.51202/9783166353184-I - Generiert durch IP 216.73.216.61, am 20.04.2026, 04:43:34. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.