

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Zielsetzung . . . . .	2
1.3. Rahmenbedingungen und eigener Beitrag zur Arbeit . . . . .	4
1.4. Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Theorie</b>	<b>7</b>
2.1. Bilanzgleichungen der Strömungsmechanik . . . . .	7
2.2. Diskretisierung der Bilanzgleichungen . . . . .	8
2.2.1. Finite-Volumen-Methode . . . . .	9
2.2.2. Diskretisierung der einzelnen Terme . . . . .	10
2.2.3. Vollständig diskretisierte Transportgleichung . . . . .	15
2.3. Kopplung von Druck- und Geschwindigkeitsfeld . . . . .	15
2.3.1. SIMPLE Druckkorrekturverfahren . . . . .	17
2.4. Randbedingungen . . . . .	18
2.5. Lösen des Gleichungssystems . . . . .	21
2.5.1. Struktur der Koeffizientenmatrix . . . . .	22
2.5.2. Krylov-Unterraum-Verfahren . . . . .	23
2.5.3. Präkonditionierung . . . . .	25
2.5.4. Testfall: Konvektions-Diffusions Gleichung . . . . .	26
<b>3. Immersed Boundary Methode</b>	<b>29</b>
3.1. Grundprinzip eingetauchter Randbedingungen . . . . .	29
3.2. Ursprung und Entwicklung des Verfahrens . . . . .	31
3.3. Vor- und Nachteile der Immersed Boundary Methode . . . . .	35
3.4. Praxisrelevanz des Verfahrens . . . . .	37
<b>4. Umsetzung des Simulationsverfahrens</b>	<b>39</b>
4.1. Kartesisches Rechengitter . . . . .	39
4.1.1. Aufgabe der Flächenelemente . . . . .	40
4.1.2. Flächenbasierte Diskretisierung . . . . .	41
4.1.3. Lokale Verfeinerung durch hängende Knotenelemente . . . . .	41
4.2. Dynamische Gitteradaption . . . . .	43
4.2.1. Konzept und Herangehensweise . . . . .	43
4.2.2. Sensorbasierte Adaption und Adaptionskontrolle . . . . .	47
4.2.3. Gitterverfeinerung . . . . .	49
4.2.4. Gittervergrößerung . . . . .	51

4.2.5.	Abschließende Aufgaben . . . . .	54
4.2.6.	Testfälle und Verifikation . . . . .	55
4.3.	Diskretisierung der Immersed Boundary . . . . .	58
4.4.	Identifizierung und Markierung . . . . .	59
4.4.1.	Auffinden der Schnittpunkte . . . . .	59
4.4.2.	Binärer Suchbaum . . . . .	62
4.4.3.	Markierung des Strömungs- und des nicht-Strömungsgebiets . . . . .	68
4.4.4.	Bestimmung der Dreiecke innerhalb des Rechengitters . . . . .	69
4.5.	Randbedingungen an Immersed Boundaries . . . . .	71
4.5.1.	Einströmrandbedingung . . . . .	72
4.5.2.	Ausströmrandbedingung . . . . .	73
4.5.3.	Wandrandbedingung . . . . .	75
4.5.4.	Validierung der IB Randbedingungen . . . . .	86
4.6.	Kopplung mit einem Verfahren zur Struktursimulation . . . . .	94
4.6.1.	Strukturmechanisches Schalelement . . . . .	95
4.6.2.	Umsetzung des Verfahrens zur Struktursimulation . . . . .	97
4.6.3.	Validierung des Strukturverfahrens . . . . .	98
4.6.4.	Kopplungsalgorithmus . . . . .	101
<b>5.</b>	<b>Anwendung des Verfahrens</b>	<b>105</b>
5.1.	Strömungen in den zentralen Atemwegen . . . . .	105
5.1.1.	Hintergrund und Vorgehen . . . . .	106
5.1.2.	Atemwegsgeometrien . . . . .	108
5.1.3.	Strömungszustand, Randbedingungen und Setup . . . . .	113
5.1.4.	Ergebnisse . . . . .	118
5.1.5.	Diskussion . . . . .	138
5.2.	Strömung um einen elastischen Zylinder . . . . .	140
5.2.1.	Konfiguration . . . . .	140
5.2.2.	Ergebnisse . . . . .	141
5.2.3.	Diskussion . . . . .	144
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>145</b>
<b>A.</b>	<b>Anhänge zur Theorie und zur Umsetzung</b>	<b>149</b>
A.1.	BiCGSTAB . . . . .	149
A.2.	Datenstruktur des Rechengitters . . . . .	149
A.3.	Sparse Matrix Format (CRS) . . . . .	150
A.4.	Quantitativer Zusammenhang: Zell- und Flächenelemente . . . . .	151
A.5.	Gitter Präprozess . . . . .	152
A.6.	Zuordnungsumkehr . . . . .	153
A.7.	Testfälle der Gitteradaption . . . . .	154
A.8.	Datenstruktur des Oberflächengitters . . . . .	154
A.9.	Algorithmus zur Suche von Objekten in einem Binärbaum . . . . .	156
A.10.	Algorithmus zur Markierung des Strömungsgebiets . . . . .	156

<b>B. Anhänge zur Anwendung des Verfahrens</b>	<b>157</b>
B.1. Arbeitsablauf: vom VCT Scan zur CFD Simulation . . . . .	157
B.1.1. Bestimmung der Deformationsfelder . . . . .	158
B.1.2. Beschnitt des Oberflächengitters . . . . .	159
B.1.3. Interpolation der Deformationsfelder . . . . .	161
B.2. Ersatzdurchmesser . . . . .	162
B.3. Strömung in einer Verzweigung . . . . .	162
B.4. Visualisierung in dynamischen Atemwegsgeometrien . . . . .	164
 <b>Literatur</b>	 <b>167</b>