

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

v

Formelzeichen

viii

| | |
|----------------------------------|------|
| Lateinische Buchstaben | ix |
| Griechische Buchstaben | xi |
| Indizes | xii |
| Sonderzeichen | xiii |
| Abkürzungen | xiii |

1 Einleitung

1

| | |
|---|----|
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Stand der Technik | 3 |
| 1.2.1 Fluid-Struktur-Wechselwirkung an Ventilen | 4 |
| 1.2.2 Aufschlagschwingungen | 8 |
| 1.2.3 Aerodynamische Kopplung von Bewegungsmoden | 11 |
| 1.3 Umriss und Zielsetzung der Arbeit | 13 |

2 Theoretische Grundlagen

15

| | |
|--|----|
| 2.1 Strömungsmechanik | 15 |
| 2.1.1 Erhaltungsgleichungen | 16 |
| 2.1.2 Turbulenz | 17 |
| 2.1.3 Bewegung von Festkörpern im Rechengebiet . . . | 18 |
| 2.2 Strukturmechanik | 23 |
| 2.2.1 Starrkörperdynamik | 23 |
| 2.2.2 Kontaktmechanik | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3 | Kopplung von Struktur- und Strömungslöser | 29 |
| 2.3.1 | Zwei-Wege-Kopplung | 29 |
| 2.3.2 | Ein-Wege-Kopplung | 32 |
| 2.4 | Vereinfachte Modellierung der Ventilströmung | 33 |
| 2.4.1 | Bestimmung von Durchfluss- und Kraft- bzw. Mo- mentenbeiwerten | 33 |
| 2.4.2 | Instationäre Ventilströmung | 35 |
| 2.4.3 | Einwegekopplung mit aerodynamischen Einfluss- koeffizienten | 35 |
| 3 | Experimentelle Untersuchungen | 37 |
| 3.1 | Prüfstands Aufbau | 37 |
| 3.2 | Klappenmodelle | 39 |
| 3.3 | Messtechnik | 41 |
| 3.4 | Auswertemethode | 42 |
| 4 | Numerische Untersuchungen | 47 |
| 4.1 | Validierung und Kalibrierung des Kontaktalgorithmus . . | 47 |
| 4.1.1 | Validierung auftretender Kontaktkräfte | 48 |
| 4.1.2 | Kalibrierung der Kontaktdämpfung | 50 |
| 4.1.3 | Kalibrierung der Referenz-Reibgeschwindigkeit . . | 51 |
| 4.1.4 | Validierung der Auswertemethode für die Energie- dissipation | 53 |
| 4.2 | Validierung des CFD-Setups | 56 |
| 4.3 | Ermittlung der aerodynamischen Beiwerte | 62 |
| 4.3.1 | Statische Korrekturbeiwerte | 63 |
| 4.3.2 | Dynamische Korrekturbeiwerte | 66 |
| 4.4 | Vergleich der Simulationsmethoden | 69 |
| 4.4.1 | Modell mit einem Bewegungsfreiheitsgrad | 69 |
| 4.4.2 | Modell mit zwei Bewegungsfreiheitsgraden | 80 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4.3 | Modell mit fünf Bewegungsfreiheitsgraden | 84 |
| 4.4.4 | Auswahl der geeigneten Simulationsmethode | 90 |
| 4.5 | Weitere Simulationsergebnisse | 97 |
| 4.5.1 | Modell mit einem Bewegungsfreiheitsgrad | 97 |
| 4.5.2 | Modell mit fünf Bewegungsfreiheitsgraden | 103 |
| 4.6 | Diskussion der Ergebnisse | 107 |
| 5 | Anwendung auf den Realmotor | 109 |
| 5.1 | Experimentelle Untersuchungen | 109 |
| 5.1.1 | Auswertemethode | 110 |
| 5.2 | Aufbau des Simulationsmodells | 112 |
| 5.2.1 | CFD-Setup und Randbedingungen | 112 |
| 5.2.2 | Übertrag der Kontaktdämpfung | 113 |
| 5.3 | Experimentelle Ergebnisse | 114 |
| 5.4 | Simulationsergebnisse | 123 |
| 5.4.1 | CFD-Ergebnisse | 124 |
| 5.4.2 | FSI-Ergebnisse | 126 |
| 6 | Zusammenfassung | 139 |
| A | Anhang | 143 |
| A.1 | Fehlerabschätzung für die experimentelle Energiedissipa- tionsrate | 143 |
| A.2 | Analytische Lösung für das Kontaktmodell | 146 |
| A.3 | Abschätzung der Kontaktdämpfung für andere Materialien | 148 |
| | Literaturverzeichnis | 151 |