

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Symbolverzeichnis</b>                                          | <b>IX</b> |
| <b>I Einführung in die Aeroelastik</b>                            | <b>1</b>  |
| <b>1 Motivation und allgemeine Grundlagen der Aerodynamik</b>     | <b>3</b>  |
| 1.1 Einleitung . . . . .                                          | 3         |
| 1.2 Aerodynamische und aeroelastische Effekte . . . . .           | 4         |
| 1.2.1 Böeninduzierte Schwingungen . . . . .                       | 4         |
| 1.2.2 Wirbelinduzierte Schwingungen . . . . .                     | 6         |
| 1.2.3 Bewegungsinduzierte Schwingungen . . . . .                  | 8         |
| 1.3 Stand der Forschung . . . . .                                 | 9         |
| 1.3.1 Experimentelle Verfahren . . . . .                          | 9         |
| 1.3.2 Numerische Verfahren . . . . .                              | 12        |
| <b>2 Die physikalische Modellierung des Brückenflatterns</b>      | <b>13</b> |
| 2.1 Selbsterregungsmechanismus . . . . .                          | 13        |
| 2.2 Das aeroelastische Lastmodell nach SCANLAN . . . . .          | 14        |
| 2.3 Stabilitätsbetrachtung und Interpretationen . . . . .         | 17        |
| 2.3.1 Stabilitätsphänomene . . . . .                              | 17        |
| 2.3.2 Biegegalloping . . . . .                                    | 17        |
| 2.3.3 Torsionsgalloping . . . . .                                 | 17        |
| 2.3.4 Biegetorsionsflattern - eine einfache Abschätzung . . . . . | 18        |
| 2.4 Die Formulierung mit Indizialfunktionen . . . . .             | 19        |
| 2.4.1 Sprungantwortfunktionen . . . . .                           | 19        |
| 2.4.2 Kraftgrößenmodell . . . . .                                 | 20        |
| 2.4.3 Überführung der Indizialfunktionen in Derivative . . . . .  | 22        |

|           |                                                                                             |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b>  | <b>Simulationsstrategie zur rechnergestützten Ermittlung aeroelastischer Instabilitäten</b> | <b>24</b> |
| 3.1       | Strategische Vorgehensweise                                                                 | 24        |
| 3.2       | Identifikation der Derivative aus harmonisch geführten Bewegungen                           | 25        |
| 3.3       | Identifikation der Derivative aus simulierten Indizialfunktionen                            | 27        |
| 3.4       | Algorithmus zur Identifikation der Derivative                                               | 28        |
| <b>II</b> | <b>Numerische Strömungsmechanik</b>                                                         | <b>31</b> |
| <b>4</b>  | <b>Grundlagen der Strömungsmechanik</b>                                                     | <b>33</b> |
| 4.1       | Allgemeines                                                                                 | 33        |
| 4.2       | Kontinuumsmechanische Grundlagen der NAVIER-STOKES-Gleichung                                | 34        |
| 4.3       | Rand- und Anfangsbedingungen                                                                | 35        |
| 4.4       | Dimensionslose Zahlen                                                                       | 36        |
| <b>5</b>  | <b>Numerische Umsetzung der NAVIER-STOKES-Gleichung</b>                                     | <b>38</b> |
| 5.1       | Allgemeines                                                                                 | 38        |
| 5.2       | Diskretisierung der NAVIER-STOKES-Gleichung                                                 | 38        |
| 5.3       | Stabilisierungsverfahren                                                                    | 40        |
| 5.4       | Der instationäre Strömungslöser                                                             | 42        |
| 5.4.1     | Linearisierung der NAVIER-STOKES-Gleichung                                                  | 42        |
| 5.4.2     | Die Lösung des instationären Problems                                                       | 43        |
| 5.5       | Numerische Beispiele                                                                        | 44        |
| 5.5.1     | Die BERNOULLI-Strömung                                                                      | 44        |
| 5.5.2     | Die KARMANSche Wirbelstraße                                                                 | 46        |
| 5.5.3     | Der umströmte Rechteckquerschnitt                                                           | 52        |
| 5.5.4     | Ein typischer Brückenquerschnitt                                                            | 55        |
| 5.6       | Ergebnisbetrachtung                                                                         | 59        |
| 5.6.1     | Mögliche Ursachen für differierende Simulationsergebnisse                                   | 59        |
| 5.6.2     | Turbulenzmodelle                                                                            | 60        |
| 5.6.3     | Weiterführende Forschung                                                                    | 61        |
| <b>6</b>  | <b>Fluid-Struktur-Interaktion</b>                                                           | <b>63</b> |
| 6.1       | Allgemeines                                                                                 | 63        |

|          |                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2      | Kontinuumsmechanische Grundlagen . . . . .                                         | 63        |
| 6.2.1    | Klassische Formulierungen . . . . .                                                | 63        |
| 6.2.2    | Die ALE-Betrachtungsweise . . . . .                                                | 64        |
| 6.2.3    | Materielle Zeitableitung der ALE-Betrachtungsweise . . . . .                       | 65        |
| 6.3      | Die Strömung auf zeitveränderlichem Gebiet . . . . .                               | 66        |
| 6.3.1    | ALE-Verfahrensweisen . . . . .                                                     | 66        |
| 6.3.2    | ALE-Formulierung der NAVIER-STOKES-Gleichung . . . . .                             | 66        |
| 6.4      | Die algorithmische Umsetzung der ALE-Formulierung . . . . .                        | 67        |
| 6.4.1    | Partitionierte Verfahren . . . . .                                                 | 67        |
| 6.4.2    | Parallelisierung der Mechanik-Module . . . . .                                     | 68        |
| 6.4.3    | Die softwaretechnische Umsetzung und Parallelisierung im System<br>FEMAS . . . . . | 70        |
| 6.5      | Numerische Beispiele . . . . .                                                     | 73        |
| 6.5.1    | Die BERNOULLI-Strömung auf veränderlichem Gebiet . . . . .                         | 73        |
| 6.5.2    | Der ALE-quasistationäre Test . . . . .                                             | 76        |
| <b>7</b> | <b>Numerische Identifikation aeroelastischer Querschnittseigenschaften</b>         | <b>77</b> |
| 7.1      | Allgemeines . . . . .                                                              | 77        |
| 7.2      | Simulation von Indizialfunktionen . . . . .                                        | 77        |
| 7.2.1    | Modellierung und Zeitdiskretisierung . . . . .                                     | 77        |
| 7.2.2    | Identifikation der WAGNER-Parameter . . . . .                                      | 80        |
| 7.3      | Simulation harmonisch geführter Bewegungen . . . . .                               | 86        |
| 7.4      | Bestimmung der Flutter-Derivative . . . . .                                        | 89        |

### **III Die Struktursimulation im Zeitbereich 93**

|          |                                                                                            |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>8</b> | <b>Numerische Flattersimulation</b>                                                        | <b>95</b> |
| 8.1      | Berechnungskonzept . . . . .                                                               | 95        |
| 8.1.1    | FE-Simulation im Zeitbereich . . . . .                                                     | 95        |
| 8.1.2    | Erläuterung der Simulation mit FEMAS-AERO . . . . .                                        | 98        |
| 8.2      | Simulation der Struktur in zwei modalen Freiheitsgraden . . . . .                          | 100       |
| 8.2.1    | Simulationsalgorithmus . . . . .                                                           | 100       |
| 8.2.2    | Modellierung bzw. Diskretisierung eines Tragwerks durch zwei Frei-<br>heitsgrade . . . . . | 101       |
| 8.2.3    | Beispiel zur Verifikation - Der TACOMA-Querschnitt . . . . .                               | 104       |

|           |                                                                                              |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.2.4     | Untersuchung der aeroelastischen Derivative aus Kap. 7.4 . . . . .                           | 106        |
| 8.3       | Anwendungsbeispiele . . . . .                                                                | 107        |
| 8.3.1     | Schrägseilbrücke . . . . .                                                                   | 108        |
| 8.3.2     | Hängebrücke . . . . .                                                                        | 114        |
| 8.3.3     | Bewertung der Simulationsergebnisse . . . . .                                                | 122        |
| 8.3.4     | Maßnahmen zur Erhöhung der aeroelastischen Stabilität . . . . .                              | 124        |
| <b>9</b>  | <b>Der Einsatz von Schwingungsdämpfern</b>                                                   | <b>127</b> |
| 9.1       | Dämpfungsstrategien im Bauwesen . . . . .                                                    | 127        |
| 9.1.1     | Grundlagen der Schwingungskontrolle . . . . .                                                | 127        |
| 9.1.2     | Der Einsatz von Schwingungsdämpfern in der<br>Bauwerksaerodynamik . . . . .                  | 132        |
| 9.2       | Schwingungsdämpfer gegen das Brückenflattern . . . . .                                       | 134        |
| 9.2.1     | Einführung . . . . .                                                                         | 134        |
| 9.2.2     | Optimierungsalgorithmen . . . . .                                                            | 135        |
| 9.2.3     | Ablauf der Stabilisierung einer Brücke - die kombinierte Simulati-<br>onsstrategie . . . . . | 144        |
| 9.2.4     | Stabilisierung einer Hängebrücke . . . . .                                                   | 146        |
| 9.3       | Sicherheitsbetrachtungen für Auslegung und Bemessung . . . . .                               | 157        |
| 9.4       | Zusammenfassung . . . . .                                                                    | 159        |
| <b>10</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                                          | <b>160</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                                                                  | <b>163</b> |