

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Nomenklatur | XIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Stand der Forschung | 3 |
| 1.1.1 Experimentelle Untersuchungen | 4 |
| 1.1.2 Theoretische Arbeiten | 6 |
| 1.1.3 Modellanpassung | 8 |
| 1.2 Einordnung und Schwerpunkte der Arbeit | 11 |
| 1.3 Gliederung der Arbeit | 13 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 17 |
| 2.1 Schwingungen linearer Systeme | 17 |
| 2.1.1 Allgemeines | 17 |
| 2.1.2 Ausgewählte Informationen zur Finite Elemente Methode | 18 |
| 2.1.3 Freie Schwingungen linearer Systeme | 22 |
| 2.1.4 Modaltransformation | 25 |
| 2.2 Strukturdynamische Eigenschaften integral gefertigter Laufräder | 27 |
| 2.2.1 Substruktureigenformen | 28 |
| 2.2.2 Laufradeigenformen | 30 |
| 2.2.3 Laufradverstimmung | 34 |
| 3 Experimentelle Grundlagen | 37 |
| 3.1 Koordinatenmesstechnik | 37 |
| 3.1.1 Allgemeines | 37 |
| 3.1.2 Photogrammetrie | 39 |
| 3.1.3 Streifenprojektionsverfahren | 43 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | Schwingungsmesstechnik | 46 |
| 3.2.1 | Allgemeines | 46 |
| 3.2.2 | Anregungsmechanismen | 48 |
| 3.2.3 | Antwortmessung | 51 |
| 3.2.4 | Signalanalyse | 53 |
| 3.2.5 | Experimentelle Modalanalyse | 58 |
| 4 | Versuchsträger, Experimente und Methoden | 63 |
| 4.1 | Versuchsträger | 63 |
| 4.2 | Laufreddigitalisierung | 65 |
| 4.3 | Schwingungsmessungen | 68 |
| 4.3.1 | Experimentelle Modalanalyse | 69 |
| 4.3.2 | Verstimmungsidentifikation | 72 |
| 4.4 | Modellanpassung | 76 |
| 4.4.1 | Geometriemodifikation | 76 |
| 4.4.2 | Steifigkeitsproportionale Modellanpassung | 81 |
| 4.5 | Automatische Schaufelvernetzung | 86 |
| 4.5.1 | Generelle Vorgehensweise und Startwertdefinition | 86 |
| 4.5.2 | Netzterstellung und Verfeinerung | 88 |
| 5 | Aufbau geeigneter Simulationsmodelle | 95 |
| 5.1 | Fragestellung und Vorgehensweise | 95 |
| 5.2 | Abbildungstreue | 100 |
| 5.3 | Konvergenzverhalten | 105 |
| 5.4 | Netzqualität und Ressourcenbedarf | 108 |
| 5.5 | Zwischenfazit | 111 |
| 6 | Simulation modaler Parameter | 113 |
| 6.1 | Simulationsmodelle des realen Laufrads | 113 |
| 6.1.1 | Eingespannte Schaufel | 113 |
| 6.1.2 | Sektormodell mit zyklisch symmetrischen Rändern | 115 |
| 6.1.3 | Vollständiges Laufradmodell | 116 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.2 | Modellabgleich mit Schwingungsmessdaten | 118 |
| 6.2.1 | Verstimmungsverteilung | 118 |
| 6.2.2 | Eigenfrequenzen und Eigenformen | 124 |
| 6.3 | Wiederholbarkeit | 130 |
| 6.3.1 | Verstimmungsverteilung | 131 |
| 6.3.2 | Eigenfrequenzen und Eigenformen | 133 |
| 6.4 | Vergleich mit steifigkeitsangepasstem Modell | 136 |
| 7 | Schlussbetrachtungen | 143 |
| 7.1 | Zusammenfassung und Interpretation | 143 |
| 7.2 | Ausblick | 147 |
| | Literaturverzeichnis | 149 |