

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Einführung und Motivation	1
1.2. Virtuelle Produktentwicklung von Flugtriebwerken	2
1.3. Stand der Forschung und Entwicklung	4
1.4. Einordnung und Gliederung der Arbeit	6
2. Theoretische Grundlagen	9
2.1. Grundlagen der Modellierung und Simulation technischer Systeme	9
2.2. Grundlagen der Finite Elemente Methode	13
2.2.1. Modellbildung der Finite Elemente Analyse	15
2.2.2. Numerische und experimentelle Modalanalyse	19
2.3. Validierung und Verifikation von FE-Modellen	24
2.3.1. Verifikation	24
2.3.2. Validierung	26
2.4. Modellunsicherheiten und Fehlerquellen	29
2.4.1. Modellierungsfehler	30
2.4.2. Numerischer Fehler	30
2.4.3. Datenfehler / Parameterfehler	31
2.5. Methoden zur Fehlerschätzung und Fehlerbehandlung	32
2.5.1. Hierarchische Modellierung	32
2.5.2. Sensitivitätsanalyse	36
2.5.3. SAFESA Ansatz	40
2.6. Modellkorrelation	42
2.6.1. Räumliche Korrelation	44
2.6.2. Korrelationskriterien	47
2.7. Modellanpassung	50
2.7.1. Sensitivitätsmethode	53
2.7.2. Optimierungsmethoden	56
2.7.3. Stochastische Methoden	58
2.8. Effizienz von FE-Modellen	59
3. Modellierung von Triebwerksstrukturen	62
3.1. Allgemeines	62
3.2. CAD-Modellierung	62
3.3. CAE-getriebene Modellierung	64
3.4. FE-Modellierung	68
3.5. Modellierung von Verbindungen	69

4. Entwicklung eines Rahmenwerkes zum Vergleich von Simulationsergebnissen	72
4.1. Vorüberlegungen und Anforderungen	72
4.2. Methoden zur vergleichenden Analyse von Modellen	73
4.2.1. Bewertung des Verteilungsfehlers	75
4.2.2. Räumliche Segmentierung	76
4.2.3. Fehlerlokalisierung	79
4.2.4. Einfluss von Randbedingungen und Belastung	82
4.3. Erarbeitung eines Leitfadens für den Vergleich von Modellen mit unterschiedlichem Detailgrad	82
4.4. Vorstellung des entwickelten Rahmenwerks zum automatisierten Modellvergleich	87
4.4.1. Entwickelter Postprozessor	89
4.4.2. Modul zur Netzanpassung	95
4.4.3. Modul zur Modellanpassung und Sensitivitätsanalyse	98
5. Modellvergleich auf Komponentenebene	104
5.1. Hochdruckturbinengehäuse	105
5.2. Niederdruckturbinengehäuse	121
5.3. Verbindungsstreben	125
5.4. Austrittsleitgitter	127
5.5. Hintere Lagerstützstruktur	130
6. Modellvergleich auf Baugruppenebene	131
6.1. Turbinenbaugruppe	131
6.2. Modellkorrelation und Modellbewertung	132
6.3. Statische Korrelation	138
6.4. Vergleich des Übertragungsverhaltens	140
6.5. Schlussfolgerungen	145
7. Schlussbetrachtungen	146
7.1. Zusammenfassung	146
7.2. Ausblick	150
A. Ergänzende Ergebnisse Modellvergleich auf Komponentenebene	151
A.1. Hochdruckturbinengehäuse	151
A.2. Korrelationsmetriken	153
Literaturverzeichnis	154